

DLR-IB-FA-BS-2018-69

**Charakterisierung der
Einflussgrößen auf die
Schallgeschwindigkeit
bei der schallbasierten
Laminatdickenmessung**

Masterarbeit

Autor: Marcel Andres
Betreuer: Nico Liebers



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-BS-2018-69

**Charakterisierung der Einflussgrößen auf die
Schallgeschwindigkeit bei der schallbasierten
Laminatdickenmessung**

Zugänglichkeit:

Stufe 1 Allgemein zugänglich.

Braunschweig, *Dezember, 2018*

Abteilungsleiter:


Dr. Markus Kleineberg

Der Bericht umfasst: 120 Seiten

Autoren:


Marcel Andres

Autor 2 / Betreuer:


Dr. Nico Liebers



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt



Technische
Universität
Braunschweig



Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Faserverbundleichtbau
und Adaptionik



Charakterisierung der Einflussgrößen auf die Schallgeschwindigkeit bei der schallbasierten Laminatdickenmessung

Masterarbeit

an der Technischen Universität Braunschweig

Verfasser: Marcel Andres

im Studiengang: Allgemeiner Maschinenbau

Matr.-Nr.: 4330563

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann (TU Braunschweig - iAF)

Betreuer:

Dr.-Ing. Naser Al Natsheh (TU Braunschweig - iAF)

Betreuer:

Dr.-Ing. Nico Liebers (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.)

Bearbeitungszeitraum: 6 Monate

Abgabedatum am: 19.10.2018

Aufgabenstellung zur Masterarbeit

für

Marcel Andres (Marcel.Andres@dlr.de)

Matrikel- Nr.: 4330563

Studiengang: Allgemeiner Maschinenbau

Zeitraum der Bearbeitung

6 Monate

Thema: Charakterisierung der Einflussgrößen auf die Schallgeschwindigkeit bei der schallbasierten Laminatdickenmessung

Übersicht

Eine Verfahrensgruppe zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen ist das Vakuuminfusionsverfahren. Dabei wird das Fasermaterial in einer Membran eingeschlossen und die entstehende Kavität evakuiert. Durch die Druckdifferenz zwischen Umgebung und Kavität wird Kunstharz in die Faserzwischenräume geleitet, welches durch eine chemische Reaktion aushärtet. Das ausgehärtete Kunstharz und die Faserverstärkung bilden zusammen einen Verbundwerkstoff. Sowohl die Infusion als auch die Aushärtung können durch Schwankungen in Ausgangsmaterialien und Prozess signifikanten Abweichungen unterliegen. Daher ist es sinnvoll, den Prozessfortschritt mit geeigneten Sensoren zu überwachen um gegebenenfalls Korrekturmaßnahmen einzuleiten.

Dabei bieten sich ultraschallbasierte Messverfahren an, durch welche der Großteil der kritischen Parameter überwacht werden kann. Auch die bei Infusionsprozessen veränderliche Laminatdicke kann über eine Laufzeitmessung abgeleitet werden. Jedoch ist die Schallgeschwindigkeit abhängig von der Art und dem Anteil der Faserverstärkung, der Temperatur und dem Aushärtezustand des Harzes. Ist die Charakteristik dieser Zusammenhänge bekannt, kann durch Kalibrierung oder Messverfahren die Laminatdicke aus der Schalllaufzeit berechnet werden. Dies ermöglicht es, die Bauteildicke gezielt einzustellen und engere Toleranzen zu erreichen.

Aufgabenstellung

Im DLR- Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik wird bereits Ultraschallsensorik zur Prozessüberwachung eingesetzt und weiterentwickelt. Bisher wurde jedoch der Einfluss der Faserverstärkung, der Aushärtung und der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit nur separat betrachtet und nur wenige Messungen durchgeführt.

Die Aufgabe besteht infolgedessen darin, eine geeignete Versuchsvorrichtung zu entwerfen, die die Variation der Einflussgrößen und die Messung der Einflussgrößen und der Schallgeschwindigkeit zulässt. Hierzu gehört auch die Möglichkeit zur Messung der Schallgeschwindigkeit des unverstärkten Harzes. Die Bestimmung des Aushärtegrades kann über separate DSC-Messungen oder Aushärtemodelle aus der gemessenen Temperatur erfolgen. Mit dieser Vorrichtung sind Versuche ausreichender Anzahl durchzuführen. Auf Basis der gewonnenen Messdaten soll der gesuchte Zusammenhang durch ein Modell beschrieben werden. Dabei kann die Schallgeschwindigkeit des unverstärkten Harzes als Eingangsparameter verwendet werden, da diese im Prozess gemessen werden kann. Das Modell soll es erlauben, die aktuelle Schallgeschwindigkeit des Verbundwerkstoffs zu ermitteln, so dass durch eine Laufzeitmessung die Laminatdicke berechnet werden kann.

Arbeitsschritte

Im Einzelnen sind folgende Arbeitsschritte zu leisten:

- Literaturrecherche
- Konzipierung und Umsetzung des Versuchsstands
- Durchführung von Versuchen und Erhebung von Messdaten
- Auswertung der Messdaten und Aufstellen eines Modells
- Dokumentation und Diskussion aller Ergebnisse in Form einer wissenschaftlichen Arbeit und Präsentation im Rahmen eines wissenschaftlichen Vortrages

Die Studienarbeit wird am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, in Braunschweig durchgeführt und seitens des DLR von Herrn Dipl.-Ing. Nico Liebers betreut.

Für Planung, Berechnung, Fertigung, Untersuchungen und Dokumentation können Labore, Werkzeuge, Einrichtungen, Programme und Rechenanlagen des DLR benutzt werden. Die Unterstützung durch das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik umfaßt die Beratung sowie Hilfe bei der Einarbeitung in die Theorie und Praxis. Die Ergebnisse sind entsprechend dem Fortschritt der Arbeit, mindestens aber einmal wöchentlich mit dem Betreuer abzusprechen.

Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann
(TU – Braunschweig)

Dipl.-Ing. Nico Liebers
(Betreuer DLR)

Eidesstattliche Erklärung

Masterarbeit
von: Marcel Andres
Matr. Nr.: 4330563

Thema: Charakterisierung der Einflussgrößen auf die Schallgeschwindigkeit bei der schallbasierten Laminatdickenmessung

Ich versichere eidesstattlich durch eigenhändige Unterschrift, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ich weiß, dass bei Abgabe einer falschen Versicherung die Prüfung als nicht bestanden zu gelten hat.

Braunschweig, 19.10.2018

Marcel Andres

Kurzfassung

Die folgende Arbeit ermittelt den Einfluss der Temperatur, des Aushärtegrades und des Faservolumengehalts auf die im Aushärteprozess auftretende Schallgeschwindigkeitsänderung von Faserverbundkunststoffen. Die Einflussgrößen werden an Proben aus glasfaser- oder kohlenstofffaserverstärktem Epoxidharz untersucht. Zur Variation der Einflussgrößen wird ein geeignetes Formwerkzeug entwickelt.

Die Messung der Schallgeschwindigkeit wird mithilfe von piezoelektrischen Keramiken durchgeführt, die am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. entwickelt wurden.

Anhand der Messergebnisse findet die Charakterisierung der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit einer Veränderlichen statt. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse werden dreidimensionale Regressionsmodelle für die Schallgeschwindigkeit der Faserhalbzeuge in Abhängigkeit von zwei Veränderlichen entwickelt, die für zukünftige Laminatdickenmessungen im Fertigungsprozess genutzt werden können.

Abstract

The following thesis is focussed on the characterization of the influencing parameters temperature, degree of cure and fibre volume content on the speed of sound during the curing process of fiber plastics. The parameters are investigated using glass fiber- and carbon fiber reinforced thermoset. Therefore, a closed mould tool is being designed which allows the variation of the influencing parameters.

For the measurement of the speed of sound, piezoelectric ceramics are being used which were developed by the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems of the German Aerospace Center.

Based on the measurement results, the characterization of the sound velocity depending on a single variable takes place. Using this information, three-dimensional regression models for the speed of sound for each fiber material are developed as a function of two variables which can be used for future laminate thickness measurements during the curing process.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Technische Grundlagen.....	4
2.1	Faserverbundwerkstoffe	4
2.2	Fertigungsmethoden für Faserverbunde	8
2.3	Ultraschall – Theoretische Grundlagen	10
3	Stand der Technik	16
3.1	Überwachung des Fertigungsprozesses von Faserverbunden.....	16
3.2	Ultraschallbasierte Laminatdickenmessung	18
3.3	Fazit zum Stand der Technik	22
4	Entwicklung des Versuchsstandes.....	24
4.1	Anforderungsprofil des Werkzeuges	24
4.2	Technische Umsetzung	26
5	Experimenteller Teil	33
5.1	Versuchsplanung und Durchführung.....	33
5.2	Analyse der Messergebnisse.....	36
6	Entwicklung des Vorhersagemodells	53
6.1	Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit	53
6.2	Einfluss des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit	57
6.3	Einfluss des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit	59
6.4	Einfluss des Aushärtegrades und der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit.....	63
6.5	Einfluss der Temperatur und des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit	69
6.6	Einfluss des Aushärtegrades und des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit	71

6.7	Methode zur Berechnung der Laminatdicke.....	75
7	Zusammenfassung und Ausblick	77
8	Literaturverzeichnis	79
9	Anhang	A
9.1	Technisches Datenblatt RTM 6.....	A
9.2	Technisches Datenblatt AL-Legierung EN AW 5083.....	E
9.3	Technisches Datenblatt Viton-Dichtungsring	F
9.4	Datenblatt Ultraschallsensor PIC255	G
9.5	Technische Zeichnung – Bodenplatte.....	H
9.6	Technische Zeichnung - Deckel.....	I
9.7	Datenblatt Glasfaserhalbzeug	J
9.8	Datenblatt Kohlenstofffaserhalbzeug	K
9.9	Abschätzung des Fehlers bei der Laminatdickenbestimmung	L

Symbolverzeichnis

Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
B	MPa	Kompressionsmodul
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
c_l	m/s	Longitudinale Schallgeschwindigkeit
c_t	m/s	Transversale Schallgeschwindigkeit
d	mm	Dicke der Kavität
D	-	Durchlässigkeitsfaktor
E	MPa	Elastizitätsmodul
f	Hz	Frequenz
FG	g/m^2	Flächengewicht
N_L	-	Anzahl der Lagen
p	bar	Druck
r	-	Regressionsparameter
R	-	Reflexionsfaktor
t_i	s	Zeitpunkt i
T_G	$^{\circ}C$	Glasübergangstemperatur
V	m^3	Volumen
Z	-	Schallimpedanz

Griechische Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
α	%	Aushärtegrad
β	dB/m	Schalldämpfung
ϑ	°C	Temperatur
ϑ_C	°C	Curie-Temperatur
λ	m	Wellenlänge
ν	-	Poisson-Konstante
ξ	m	Teilchenauslenkung
ρ	g/cm ³	Dichte
ρ_F	g/cm ³	Faserdichte
ρ_M	g/cm ³	Matrixdichte
τ	μs	Signallaufzeit
ϕ	%	Faservolumengehalt
ω	Hz	Kreisfrequenz

Abkürzungsverzeichnis

<i>CFK</i>	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
<i>DLR</i>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<i>DSC</i>	Differential scanning calorimetry
<i>DS</i>	Durchschallung
<i>E-Modul</i>	Elastizitätsmodul
<i>IE</i>	Impuls-Echo
<i>FA</i>	Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
<i>FVG</i>	Faservolumengehalt
<i>FVK</i>	Faserverbundkunststoff
<i>GFK</i>	Glasfaserverstärkter Kunststoff
<i>MS</i>	Messstelle
<i>PS</i>	Prüfstelle
<i>PZT</i>	Blei-Zirkonat-Titanat
<i>RH</i>	Reinharz
<i>RTM</i>	Resin Transfer Moulding
<i>US</i>	Ultraschall
<i>VARTM</i>	Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grafischer Aufbau der Arbeit	3
Abbildung 2: a) Einzelschicht bestehend aus unidirektional ausgerichteten Fasern und b) Mehrschichtverbund aus miteinander verbundenen Einzelschichten [1].....	4
Abbildung 3: Schematische Darstellung zweidimensionaler Textilte nach [6]	6
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines multiaxialen Geleges nach [3]	6
Abbildung 5: Exemplarische Darstellung eines TTT-Diagramms [7].....	7
Abbildung 6: Prozessschritte des LCM-Verfahrens (nach [10, 11])	9
Abbildung 7: Schematische Darstellung des RTM-Verfahrens [15]	10
Abbildung 8: Unterschiede in der Schwingungsrichtung der Teilchen von a) longitudinal- und b) Transversalwellen bei gleicher Ausbreitungsrichtung [16]	11
Abbildung 9: Schallübertragung zwischen zwei verschiedenen Materialien mit unterschiedlicher Schallimpedanz Z_i sowie die Visualisierung des eingehenden Schalldrucks p_e , des durchgehenden Schalldrucks p_d und des reflektierten Schalldrucks p_r	13
Abbildung 10: Darstellung einer PZT-Elementarzelle in der a) paraelektrischen und der b) ferroelektrischen Phase bei spontaner Polarisation P_s nach [20].....	15
Abbildung 11: Einflüsse auf den Aushärteprozess von FVK (nach [21])	16
Abbildung 12: Vereinfachte schematische Darstellung des IE-Verfahrens ohne Formwerkzeug	19
Abbildung 13: Schematische Darstellung des DS-Verfahrens.....	20
Abbildung 14: Schematische Darstellung eines Versuchsaufbaus zur Online-Dickenmessung [46].....	21
Abbildung 15: Zusammenfassung der Anforderungen an das zu fertigende Werkzeug und Unterteilung in Festanforderungen (F) und Wunschanforderungen (W)	26
Abbildung 16: Schematische Darstellung eines zweiteiligen Werkzeuges bestehend aus Deckel und Bodenplatte mit unterschiedlicher Kavitätshöhe d_i	27

Abbildung 17: Schematische Darstellung der Messung der Schallgeschwindigkeit und der Temperatur im Reinharzbereich und im FVK.....	28
Abbildung 18: Schematische Darstellung des Werkzeuges inklusive Dichtung, Infusions- und Evakuierungsstellen	30
Abbildung 19: Werkzeug-Deckel mit Aussparungen für die Ultraschallsensoren	30
Abbildung 20: Konstruktive Entformungsmaßnahmen an der Bodenplatte	31
Abbildung 21: Endgültiger Aufbau des Formwerkzeuges und Abmaße	32
Abbildung 22: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (Messaufbau nach [17])	34
Abbildung 23: Entwicklung der Schallgeschwindigkeit im Versuch GFK-120-02 (isotherm) im faserverstärkten Bereich (Kanal 2)	36
Abbildung 24: Entwicklung der Schallgeschwindigkeit im Versuch GFK-120-02 (isotherm) im Reinharzbereich (Kanal 30).....	37
Abbildung 25: Vergleich der Schallgeschwindigkeitsentwicklung des GFK-120-02 Versuches im faserverstärkten Bereich (Kanal 2) und im Reinharzbereich (Kanal 30)	38
Abbildung 26: Amplitudenverlauf des DS-Verfahrens im Versuch GFK-120-02 (Kanal 30) zum Zeitpunkt des Signalabbruchs.....	39
Abbildung 27: Amplitudenverlauf des IE-Verfahrens (Sensor 29) im Versuch GFK-120-02 (Kanal 30) zum Zeitpunkt des Signalabbruchs	40
Abbildung 28: Abbruchzeiten des Durchschallungssignals im Reinharzbereich (Kanal 30) der GFK-Versuchsreihe.....	40
Abbildung 29: Gelzeit und Vitrifikationspunkt von RTM 6 bei isothermer Temperierung und gemessene Signalabbruchzeiten der GFK-Proben [45].....	41
Abbildung 30: Zeitliche Veränderung des Temperaturverlaufs (rot) und des Aushärtegrades (blau) im Versuch GFK-120-1.....	42
Abbildung 31: Vergleich der Schallgeschwindigkeitsentwicklung der Versuche GFK-120-1 (blau) und GFK-120-2 (orange) im Bereich höchsten FVG (Stufe 1/Kanal 2)	43
Abbildung 32: Vergleich der Schallgeschwindigkeitsentwicklung der Versuche GFK-120-01 (blau) und GFK-120-02 (orange) im Reinharzbereich (Stufe 6/Kanal 30)	44
Abbildung 33: Vergleich des Temperaturverlaufes und des Aushärtegrades im Versuch GFK-130 im faserverstärkten Bereich (FVK) und im Reinharzbereich (RH)	45

Abbildung 34: Vergleich des Temperaturverlaufes und des Aushärtegrades im Versuch GFK-190 im faserverstärkten Bereich (FVK) und im Reinharzbereich (RH)	46
Abbildung 35: Schematische Darstellung (Draufsicht) der Probekörper und Markierungen der Messstellen (MS) zur Bestimmung der Laminatdicke	48
Abbildung 36: Darstellung der Temperaturabhängigkeit im Reinharzgebiet (Kanal 30) der Schallgeschwindigkeit mit $\phi = 0$ und $\alpha \approx 0$ inklusive potentieller Regression. 54	
Abbildung 37: Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit bei GFK mit $\phi \approx 50\%$ und $\alpha \approx 0\%$	55
Abbildung 38: Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit bei CFK mit $\phi \approx 50\%$ und $\alpha \approx 0\%$	56
Abbildung 39: Darstellung des Einflusses des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit im Versuch GFK-130 inklusive linearer Regression ...	57
Abbildung 40: Darstellung des Einflusses des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit im Versuch CFK-130 inklusive linearer Regression ...	58
Abbildung 41: Darstellung der Abhängigkeit des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit im Reinharzbereich (Kanal 30) im Versuch GFK-130.	60
Abbildung 42: Darstellung der Abhängigkeit des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit im glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK-130) bei einem Faservolumengehalt von 51,2%	61
Abbildung 43: Darstellung der Abhängigkeit des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit im kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff (CFK-130) bei einem Faservolumengehalt von 49,5%	62
Abbildung 44: Dreidimensionale Darstellung der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur und dem Aushärtegrad im Reinharzgebiet (Kanal 30).....	63
Abbildung 45: Draufsicht zur Darstellung der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit zur Temperatur und zum Aushärtegrad im Reinharzbereich	65
Abbildung 46: Dreidimensionale Darstellung der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur und dem Aushärtegrad im glasfaserverstärkten Kunststoff bei einem Faservolumengehalt von ungefähr 56% (Kanal 10)	65
Abbildung 47: Draufsicht zur Darstellung der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit zur Temperatur und zum Aushärtegrad im glasfaserverstärkten Bereich	66

Abbildung 48: Dreidimensionale Darstellung der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur und dem Aushärtegrad im kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff bei einem Faservolumengehalt von ungefähr 50% (Kanal 12)	67
Abbildung 49: Draufsicht zur Darstellung der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur und des Aushärtegrades im kohlenstofffaserverstärkten Bereich	68
Abbildung 50: Dreidimensionale Abbildung zur Darstellung der Einflüsse der Temperatur und des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit der GFK-Versuche zum Zeitpunkt der Infusion mit einem Aushärtegrad von ungefähr 0%	69
Abbildung 51: Draufsicht der Darstellung der Einflüsse des Faservolumengehalts und der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit	70
Abbildung 52: Dreidimensionale Darstellung der Einflüsse des Faservolumengehalts und des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit im glasfaserverstärkten Kunststoff bei einer isothermen Aushärtung von 170°	71
Abbildung 53: Dreidimensionale Darstellung der Einflüsse des Faservolumengehalts und des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit im kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff bei einer isothermen Aushärtung von 170°	73
Abbildung 54: Draufsicht der Darstellung der Einflüsse des Aushärtegrades und des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit im Versuch CFK-170 ...	74
Abbildung 55: Technische Zeichnung der Formwerkzeug-Bodenplatte (nicht maßstabsgetreu)	H
Abbildung 56: Technische Zeichnung des Formwerkzeug-Deckels (nicht maßstabsgetreu) ...	I
Abbildung 57: Technisches Datenblatt SAERTEX Y-E-1217g/m ²	J
Abbildung 58: Technisches Datenblatt Tenax-E IMS54 E23 24K 830tex	K

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Technologien zur Prozessüberwachung im Faserverbundkontext inklusive Literaturverweisen (nach [30]).....	17
Tabelle 2: Übersicht der Verteilung der Sensorpaare und Höhen der einzelnen Stufen	31
Tabelle 3: Stufenweise Zuordnung der Kanäle des Multiplexers	34
Tabelle 4: Übersicht der durchgeführten Versuche inklusive Anmerkungen	35
Tabelle 5: Maximaler Unterschied des Aushärtegrades im faserverstärkten und Reinharzbereich	47
Tabelle 6: Vergleich der Solltemperaturen mit den gemessenen Temperaturen der isotherm ausgehärteten GFK-Versuche	47
Tabelle 7: Vergleich der Solltemperaturen mit den gemessenen Temperaturen der isotherm ausgehärteten CFK-Versuche	47
Tabelle 8: Gemessene Dicken und erreichter FVG im Versuch GFK-120-02. Die Tabelleneinträge folgen der Verteilung der Messstellen in Abbildung 35	49
Tabelle 9: Übersicht der gemittelten, stufenweise erreichten FVG aller GFK Versuche	50
Tabelle 10: Gemessene Dicken und erreichter FVG im Versuch CFK-130. Die Tabelleneinträge folgen der Verteilung der Messstellen in Abbildung 35	51
Tabelle 11: Übersicht der gemittelten, stufenweise erreichten FVG aller CFK Versuche.....	51
Tabelle 12: Übersicht der zu untersuchenden Permutationen auf die Auswirkungen auf die Schallgeschwindigkeit.....	53
Tabelle 13: Regressionsparameter für $c_{RH}(\alpha, \vartheta)$	64
Tabelle 14: Regressionsparameter für $c_{GFK}(\alpha, \vartheta)$	66
Tabelle 15: Regressionsparameter für $c_{CFK}(\alpha, \vartheta)$	68
Tabelle 16: Regressionsparameter für $c_{GFK}(\alpha, \phi)$	72
Tabelle 17: Regressionsparameter für $c_{CFK}(\alpha, \phi)$	73
Tabelle 18: Übersicht der Parameter zur Abschätzung der Auswirkungen des Fehlers bei der Variation des Faservolumengehalts um $\pm 5\%$	L

1 Einleitung

Motivation

Die Auslegung von Faserverbundkunststoffen (FVK) findet unter Beachtung von Sicherheitsfaktoren aufgrund von Fertigungstoleranzen statt, die zu einer nicht optimalen Ausnutzung der Materialeigenschaften führen und sich negativ auf das Leichtbaupotential auswirken. Ein Grund hierfür sind Dickenvariationen bei der Fertigung von Faserverbundkunststoffen, die aus Prozessschwankungen des Fertigungsprozesses resultieren.

Um dem entgegenzuwirken, kann eine Überwachung der Laminatdickenentwicklung genutzt werden, damit gegebenenfalls Korrekturmaßnahmen eingeleitet werden können. Dafür muss ein Sensorsystem entwickelt werden, welches unter Industriebedingungen einsetzbar ist.

Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. arbeitet an der Entwicklung von Ultraschallsensoren, die eine solche Messung ermöglichen. Durch Auswertung der Signallaufzeit und der Schallgeschwindigkeit können Rückschlüsse auf die Laminatdicke getroffen werden.

Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit eines faserverstärkten Kunststoffes ist von mehreren Faktoren abhängig. Dies sind der Faservolumengehalt, die Temperatur, der Aushärtegrad sowie das verwendete Faserhalbzeug und Harzsystem. Im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik wurden bereits erste Untersuchungen der Einflussgrößen durchgeführt. Allerdings hat bisher nur eine separate Untersuchung der Einflussgrößen mit wenigen Versuchen stattgefunden.

Aus diesem Grund werden zur genaueren Charakterisierung der Einflussgrößen auf die Schallgeschwindigkeit weitere Messungen durchgeführt und die Wechselwirkungen zwischen den Parametern untersucht. Hierdurch sollen eine Kalibrierung der Schallgeschwindigkeit und eine exaktere Laminatdickenmessung im Fertigungsprozess ermöglicht werden.

Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 befasst sich mit der Vorstellung der technischen Grundlagen, die für das Verständnis der vorliegenden Thesis notwendig sind. Es findet eine Einführung in die Faserverbundkunststoffe und eine Vermittlung der theoretischen Grundlagen der Ultraschallsensorik statt. Anschließend wird in Kapitel 3 der Stand der Technik bezüglich der ultraschallbasierten Laminatdickenmessung dargestellt. Basierend auf den Grenzen des Standes der Technik wird die Forschungshypothese formuliert.

Zur Bestimmung der Auswirkungen der Einflussgrößen auf die Schallgeschwindigkeit wird in Kapitel 4 ein Versuchsstand entwickelt, der die Variation der zu untersuchenden Parameter erlaubt. Des Weiteren wird eine Übersicht über die durchgeführten Versuche erstellt. Im Anschluss daran erfolgen in Kapitel 5 die Auswertung und die Interpretation der Versuchsergebnisse.

Basierend auf den Messergebnissen wird in Kapitel 6 die Modellbildung zur Beschreibung der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von einer oder zwei Variablen beschrieben und eine Möglichkeit zur Bestimmung der Laminatdicke im Fertigungsprozess vorgestellt.

In Kapitel 7 werden die gewonnenen Erkenntnisse dieser Thesis und ein Ausblick auf weiterführende Fragestellungen gegeben.

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1 grafisch dargestellt.

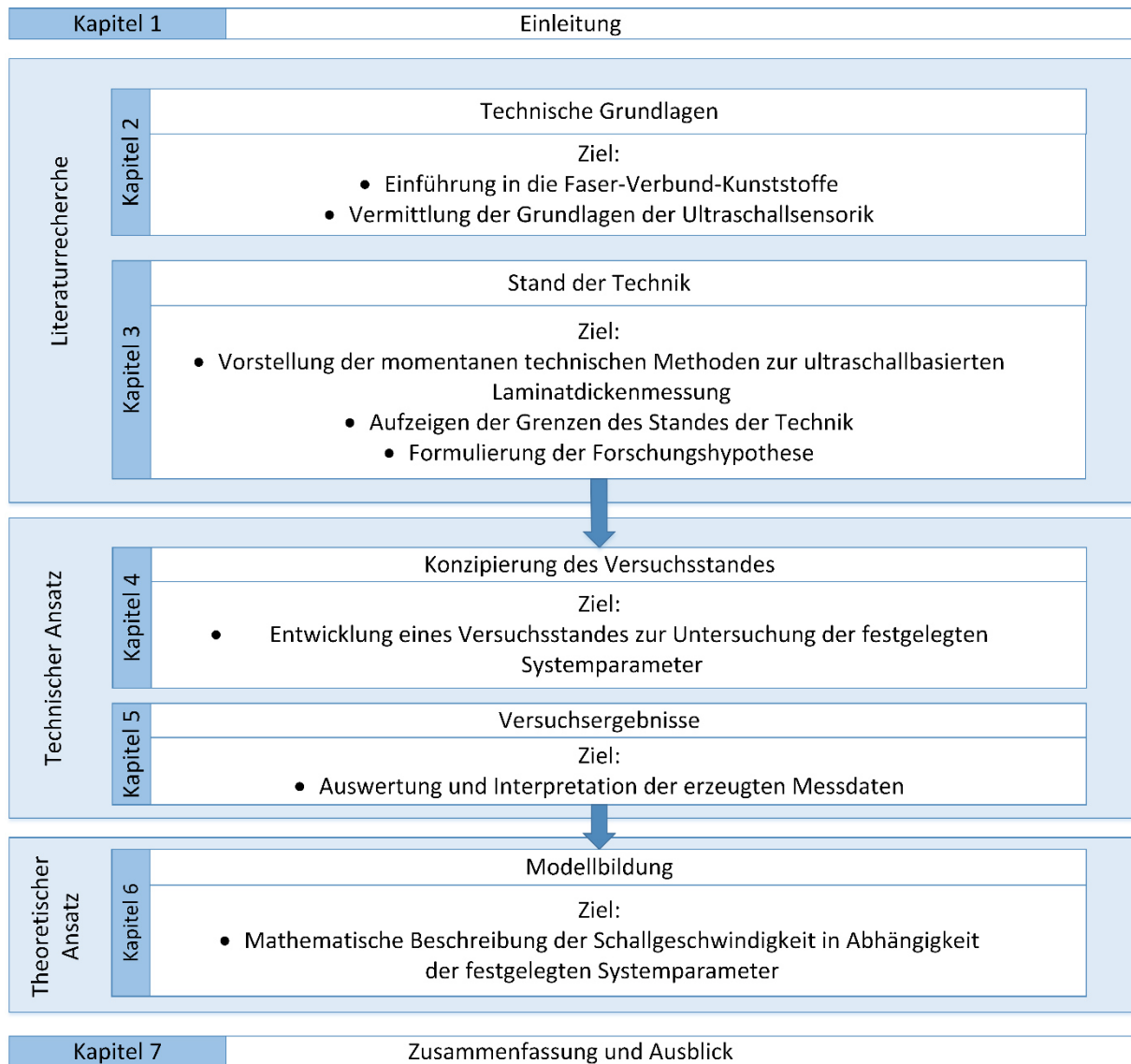


Abbildung 1: Grafischer Aufbau der Arbeit

2 Technische Grundlagen

Im zweiten Kapitel werden die für diese Arbeit notwendigen theoretischen und technischen Grundlagen vorgestellt.

2.1 Faserverbundwerkstoffe

Faserverbundwerkstoffe bestehen aus mindestens zwei Komponenten. Dem Verstärkungsmaterial in Form von Fasern und der einbettenden Matrix (vgl. Abbildung 2). Bei Faserverbundkunststoffen (FVK) besteht die Matrix aus Kunststoff. Zumeist werden Duroplaste, Thermoplaste oder Elastomere verwendet.

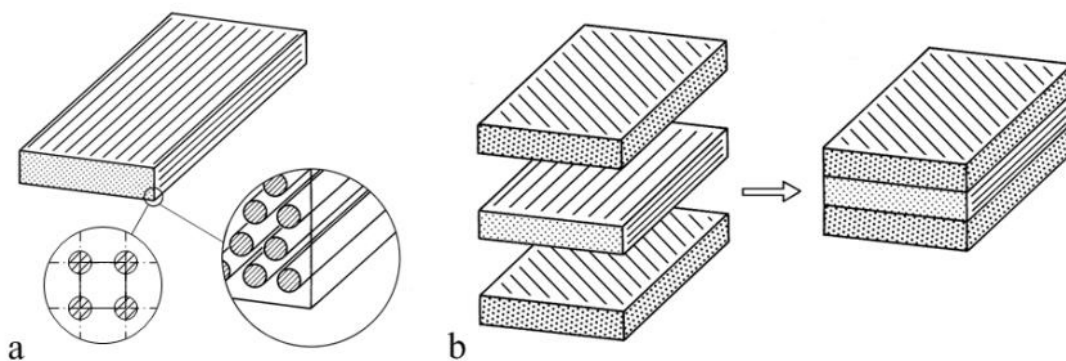


Abbildung 2: a) Einzelschicht bestehend aus unidirektional ausgerichteten Fasern und b) Mehrschichtverbund aus miteinander verbundenen Einzelschichten [1]

Das Volumen des Verbundes $V_{Verbund}$ setzt sich aus der Summe des Faservolumens V_{Faser} , des Matrixvolumens V_{Matrix} und des Leerstellenvolumens $V_{Leerstellen}$, welches aufgrund einer nicht vollständigen Tränkung aller Fasern oder durch Gaseinschlüsse entstehen kann, zusammen. Der Faseranteil des Verbundes wird als Faservolumengehalt (FVG) ϕ bezeichnet und ist wie folgt definiert [2]:

$$\phi = \frac{V_{Faser}}{V_{Verbund}} = \frac{V_{Faser}}{V_{Faser} + V_{Matrix} + V_{Leerstellen}} \quad 2-1$$

Für lasttragende Strukturbauteile ist ein Faservolumengehalt von 40-60% üblich [3].

Sowohl das Verstärkungsmaterial als auch das Matrixmaterial haben unterschiedliche Aufgaben im Verbund zu übernehmen [4]. Die Fasern sind zuständig für

- die Aufnahme von Zug- und Druckspannungen
- die Erhöhung der Steifigkeit und der Festigkeit

und die Matrix für

- den Schutz der Fasern
- die Einleitung der Kräfte in die Fasern und die Überleitung der Kräfte zwischen einzelnen Fasern
- die Formerhaltung des Verbundes
- die Erhöhung des Biegeträgheitsmomentes.

Abhängig von den Anforderungen können unterschiedliche Faser- und Matrixkombinationen gewählt werden. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten näher erläutert.

Verstärkungsmaterial

Da die Fasern die Eigenschaften des Verbundes in der Faserrichtung maßgeblich beeinflussen, werden sie meist nach ihren mechanischen Merkmalen ausgewählt [2]. In der Industrie werden größtenteils Glasfasern und zunehmend Kohlenstofffasern verwendet. Wobei Glasfasern den Markt mit einem Marktanteil von 95% dominieren [5]. Es gibt jedoch noch weitere Arten, wie zum Beispiel Aramid- oder Naturfasern, die allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

Abhängig von der Länge der Fasern findet eine Unterteilung in Faserflocken (0,03-0,3mm), Kurzfasern ($\approx 5\text{mm}$), lange Kurzfasern (bis 50mm) und sogenannte Endlosfasern ($> 50\text{mm}$) statt [1]. Aus Endlosfasern lassen sich unterschiedliche textile Flächengebilde herstellen (vgl. Abbildung 3). In dieser Arbeit wird mit unidirektionalen Fasergelegen gearbeitet. Diese Gelege bestehen aus parallel angeordneten endlosen Einzelfäden, die als Rovings bezeichnet werden [1]. Im Vergleich zum Gewebe oder Geflecht findet bei einem Gelege keine Ondulation der Fasern statt. Hierdurch wird eine gleichmäßigere Reflexion des Ultraschallsignals erwartet.

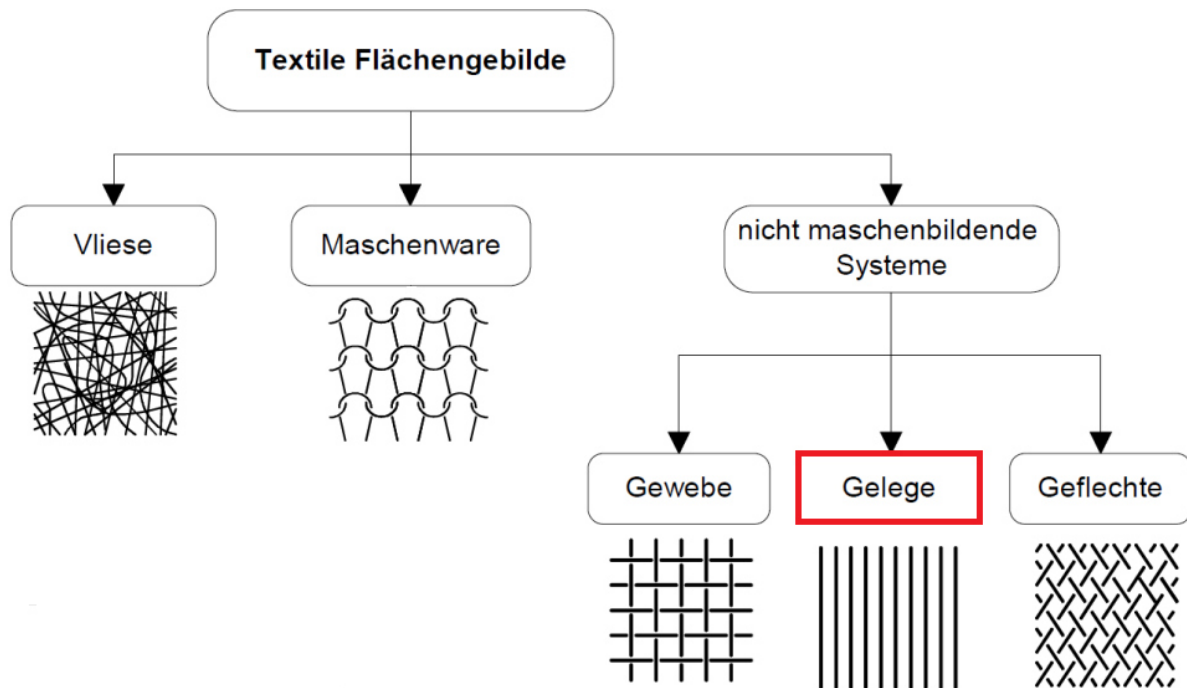


Abbildung 3: Schematische Darstellung zweidimensionaler Textilie nach [6]

Werden mehrere Gelege unterschiedlicher Orientierung übereinandergelegt und vernäht, wird dies als multiaxiales Gelege bezeichnet (vgl. Abbildung 4). Hierdurch können FVK so ausgelegt werden, dass sie eine optimale Kraftaufnahme in verschiedene Belastungsrichtungen ermöglichen. In Abhängigkeit der Faserrichtungen kann somit ein quasiisotropes Laminat entstehen.

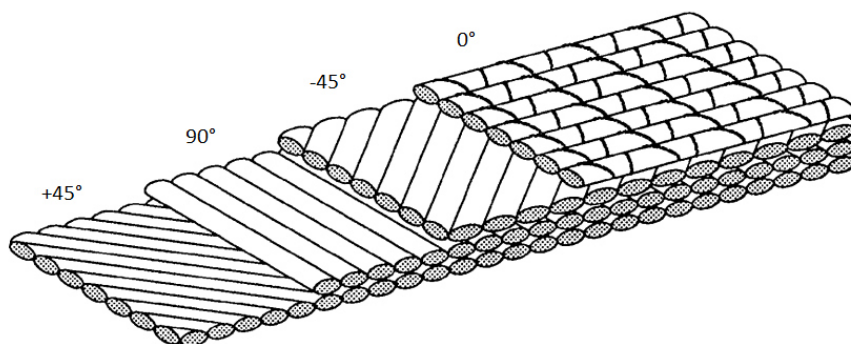


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines multiaxialen Geleges nach [3]

Matrix

Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich mit Epoxidharzen gearbeitet. Epoxidharze gehören zur Gruppe der Duroplaste. Durch Kombination von Harz und Härter wird eine exotherme Reaktion ausgelöst. Diese Reaktion führt zu einer dreidimensionalen Vernetzung und schließlich zur Bildung des festen Kunststoffes. Dieser Vorgang wird auch als Härtung oder Polyaddition bezeichnet. [7]

Während der Härtung durchläuft das Harzsystem unterschiedliche morphologische Zustände. Eine Möglichkeit zur Visualisierung des Aushärteprozesses ist das Time-Temperature-Transition (TTT-) Diagramm (vgl. Abbildung 5).

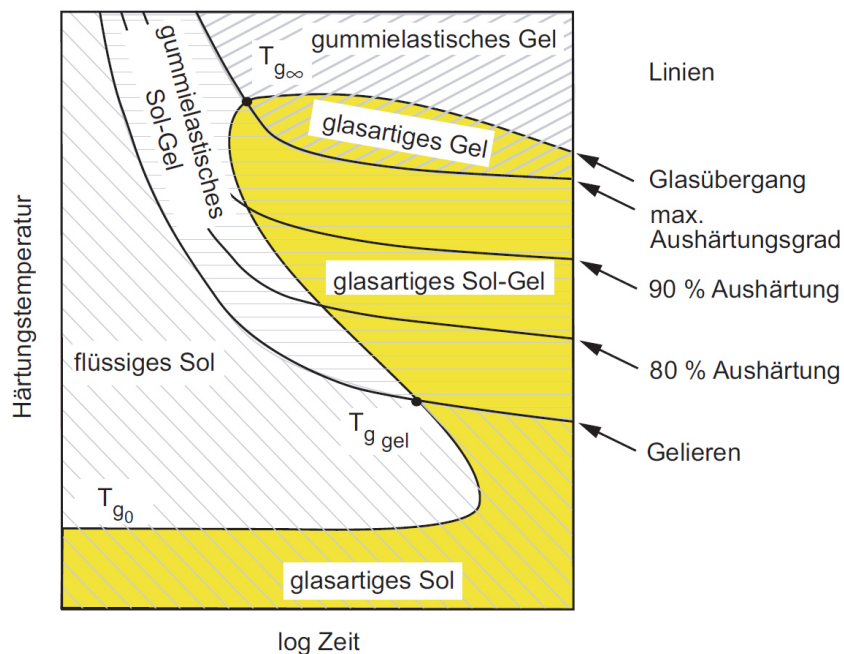


Abbildung 5: Exemplarische Darstellung eines TTT-Diagramms [7]

Im TTT-Diagramm wird die Härtungstemperatur über die Zeit aufgetragen. Die Abszisse ist dabei logarithmisch skaliert. Eine horizontale Linie innerhalb dieses Diagramms beschreibt eine isotherme Härtung.

Sol beschreibt ein komplett in Lösungsmittel lösbares und nur wenig ausgehärtetes Harzprodukt. Sol-Gel stellt eine Mischung aus unlöslichen und löslichen Harzanteilen und Gel letztlich eine vollständig ausgehärtete und nicht mehr lösliche Form des Harzsystems dar.

Während der Aushärtung werden drei maßgebende morphologische Zustände durchlaufen. Dies sind der flüssige, der gelartige und der glasartige Zustand. Der Wechsel

vom flüssigen zum gummielastischen Sol wird durch die Gellinie und der Übergang vom gummielastischen Sol zum glasartigen Sol durch die Verglasungslinie bzw. die Vitrifikationslinie dargestellt. Die Übergänge gehen mit signifikanten Änderungen der thermomechanischen Eigenschaften des Harzsystems einher. Diese zeichnen sich durch deutlich erkennbare makroskopische Veränderungen des Harzes aus und werden durch unterschiedliche Schattierungen dargestellt.

T_{G_0} , $T_{G_{Gel}}$ und $T_{G_{\infty}}$ bezeichnen die Glasübergangstemperaturen des Harzes. Unterhalb der Glasübergangstemperatur des unvernetzten Harzes T_{G_0} findet auf Grund stark eingeschränkter Diffusionsvorgänge keine nennenswerte Aushärtung des Harzes statt. Durch die Überschreitung T_{G_0} wird das Harz flüssig. Für Aushärtungstemperaturen unter $T_{G_{Gel}}$ findet nur eine geringe Aushärtung statt. Erst bei Temperaturen oberhalb von $T_{G_{Gel}}$ kann eine fortschreitende Härtung erfolgen. In diesem Temperaturbereich durchläuft das Harz zunächst die flüssige Zone und wird nach dem Überqueren der Gellinie gelartig. Es ist erkennbar, dass hohe Aushärtungsgrade erst in höheren Temperaturbereichen erreicht werden. Die maximale erreichbare Glasübergangstemperatur wird durch $T_{G_{\infty}}$ dargestellt. Oberhalb dieses Bereiches findet keine Verglasung statt und das Harz verbleibt in einem gummielastischen Zustand. Nach einiger Zeit härtet das System auch hier vollkommen aus.

Bei zu hohen Temperaturen muss beachtet werden, dass das System thermische Schäden davontragen kann. Hierdurch kann eine Erweichung oder auch Devitrifikation stattfinden. [7, 8]

2.2 Fertigungsmethoden für Faserverbunde

Zur Fertigung von Faserverbunden werden verschiedene Verfahren genutzt. Dazu gehören das Handlaminatverfahren, die Verwendung von vorimprägnierten Faserhalbzeugen („Prepreg“) sowie Harzinjektionsverfahren. Letztere sind unter dem Begriff Liquid Composite Moulding Verfahren zusammengefasst (LCM-Verfahren). Ziel der LCM-Verfahren ist die vollständige Imprägnierung des Verstärkungsmaterials durch die Matrix. Dafür wird üblicherweise ein Druckgefälle zwischen dem Harzreservoir und

der Kavität angelegt, wodurch das trockene Verstärkungsmaterial mit dem niedrigviskosen Matrixsystem getränkt werden kann. [3, 9]

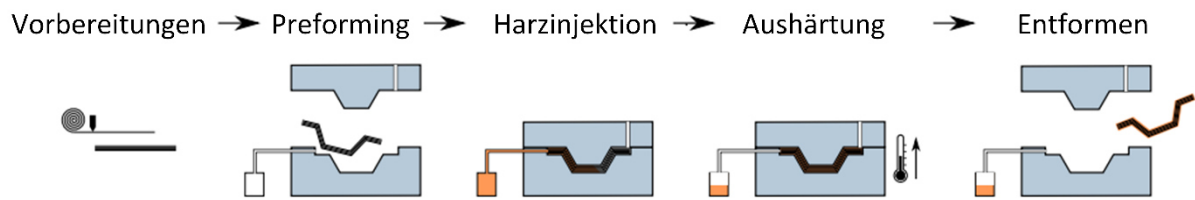


Abbildung 6: Prozessschritte des LCM-Verfahrens (nach [10, 11])

Die Abbildung 6 stellt den typischen Ablauf eines LCM-Verfahrens dar. Im ersten Prozessschritt werden die Vorbereitungen für die Fertigung getroffen. Diese beinhalten neben dem Zuschneiden des Verstärkungsmaterials auch insbesondere die Reinigung des Werkzeugs. Durch zusätzliches Aufbringen eines Trennmittels wird das spätere Entformen erleichtert.

Bei komplexen Geometrien bietet sich ein Preforming des Verstärkungsmaterials an. Hierbei werden die Einzellagen zu einem Laminat verbunden und das zugrunde liegende zweidimensionale Verstärkungsmaterial in eine endkonturnahe dreidimensionale Form drapiert [12]. Anschließend wird der Preform in das Formwerkzeug gelegt und verschlossen. Dies geschieht entweder durch ein massives Formwerkzeug („closed mould“) oder durch eine Membran („open mould“). Nach der Harzinjektion findet die Aushärtung des Harzsystems unter erhöhter Temperatur statt. Beim Entformen wird letztlich das Formwerkzeug wieder geöffnet und der Prozess ist abgeschlossen.

Im Folgenden wird das für diese Arbeit verwendete LCM-Verfahren vorgestellt.

RTM-Verfahren

Das Resin Transfer Moulding (RTM-) Verfahren ist die älteste Nasstechnologie zur Fertigung von Faserverbundkunststoffen und ein Vertreter der Closed Mould Verfahren [13]. Bei diesem Verfahren wird der Preform zwischen ein mehrteiliges Werkzeug gelegt. Durch das Werkzeug können Form und Faservolumengehalt des FVK vorgegeben werden (vgl. Abbildung 7). Es kann demnach direkter Einfluss auf die Bauteildicke genommen werden [14].

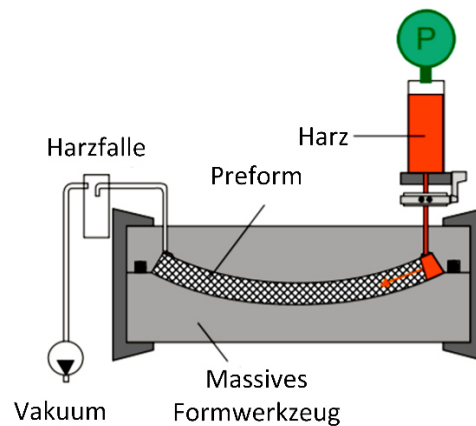


Abbildung 7: Schematische Darstellung des RTM-Verfahrens [15]

Die Harzinfusion wird über einen Überdruck des Harzes eingeleitet. Zusätzlich kann durch die Evakuierung der Kavität eine weitere Qualitätssteigerung erreicht werden. Dies wird als Vacuum Assisted (VA)-RTM-Verfahren bezeichnet. Durch die glatten Oberflächen des Werkzeuges wird eine hohe Oberflächengüte des Faserverbundes gewährleistet, wodurch der Aufwand der Nachbearbeitung minimiert werden kann.

2.3 Ultraschall – Theoretische Grundlagen

Ausbreitung von Schallwellen

Ultraschall bezeichnet mechanisch erzeugte Schallwellen innerhalb eines Frequenzbereiches, der oberhalb der von Menschen wahrnehmbaren Frequenzen liegt (>20 kHz). Wie bei allen Schallwellen gilt die folgende Beziehung zwischen Schallgeschwindigkeit c , Frequenz f und der Wellenlänge λ .

$$c = f\lambda \quad 2-2$$

Bei der Ausbreitung von Schallwellen in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen werden zwei grundlegende Arten von Wellen unterschieden: Die Longitudinal- und Transversalwellen. Bei beiden Wellen findet eine Wechselwirkung zwischen den einzelnen Teilchen statt. Die Unterschiede sind Abbildung 8 schematisch dargestellt.

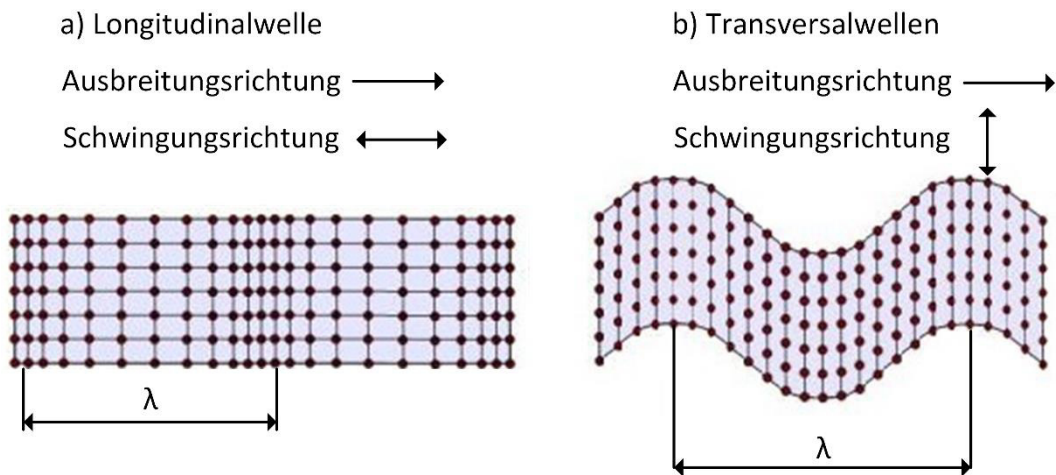


Abbildung 8: Unterschiede in der Schwingungsrichtung der Teilchen von a) longitudinal- und b) Transversalwellen bei gleicher Ausbreitungsrichtung [16]

Es ist erkennbar, dass bei Longitudinalwellen die Bewegungsrichtung der Teilchen mit der Ausbreitungsrichtung der Welle übereinstimmt. Longitudinalwellen entstehen aus dem Wechsel von Zug- und Druckkräften. Bei Transversalwellen hingegen findet die Teilchenauslenkung orthogonal zur Ausbreitungsrichtung statt. Diese Wellen werden auch Scherwellen genannt und resultieren aus Schub- und Scherkräften. Da Flüssigkeiten und Gase nicht in der Lage sind diese Kräfte zu übertragen, können sich Transversalwellen nur in Festkörpern ausbreiten. [16]

Berechnung der Schallgeschwindigkeit

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall ist materialabhängig und wird durch den E-Modul E , die Dichte ρ und der Poisson-Konstante ν beeinflusst. Die Poisson-Konstante (auch Querkontraktionszahl genannt) liegt für feste Werkstoffe zwischen 0 und 0,5 [16].

Die longitudinale Schallgeschwindigkeit kann nach [16] wie folgt berechnet werden:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - \nu)}} \quad 2-3$$

Unter Zuhilfenahme des Kompressionsmoduls B , lässt sich c_l alternativ wie folgt bestimmen:

$$c_l = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad 2-4$$

In Abhängigkeit von c_l lässt sich die transversale Schallgeschwindigkeit c_t bestimmen:

$$c_t = c_l \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}} \quad 2-5$$

Da die Poissonzahl stets $\leq 0,5$ ist, liegt der Term $\sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}$ zwischen 0 und 0,707. Daraus folgt, dass sich Transversalwellen langsamer ausbreiten als Longitudinalwellen.

Schalldruck und Schallwiderstand

In Abhängigkeit der Auslenkung der Teilchen ξ und der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ lässt sich der Schalldruck p bestimmen, welcher die Druckverhältnisse in Schallwellen beschreibt.

$$p = \rho c \omega \xi \quad 2-6$$

Das Produkt aus Dichte ρ und Schallgeschwindigkeit c wird als Schallimpedanz bezeichnet. Es gilt:

$$\rho c = Z \quad 2-7$$

Die Schallimpedanz ist eine materialspezifische Kenngröße und kann zur Bestimmung des Reflexions- bzw. Durchlässigkeitsfaktors des Schalldrucks bei der Schallübertragung zwischen verschiedenen Materialien genutzt werden [16]. Dies wird im Folgenden weiter erläutert.

Schallübertragung an ebenen Grenzflächen

Bei der Übertragung von Schallwellen von einem Material in ein weiteres müssen stets Grenzflächen überwunden werden. Ein Beispiel hierfür ist die Übertragung des Erregersignals in das Werkzeug. Werden vereinfacht ebene Wellen betrachtet, welche auf eine gerade Grenzfläche treffen, so können symmetriebedingt nur ebene Wellen senkrecht von der Grenzfläche reflektiert werden oder durch sie hindurchgehen (vgl. Abbildung 9).

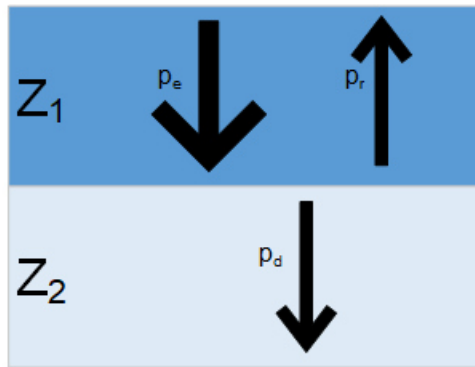


Abbildung 9: Schallübertragung zwischen zwei verschiedenen Materialien mit unterschiedlicher Schallimpedanz Z_i sowie die Visualisierung des eingehenden Schalldrucks p_e , des durchgehenden Schalldrucks p_d und des reflektierten Schalldrucks p_r

Bei der Bestimmung des Durchlässigkeitsfaktors D wird das Verhältnis von p_d zu p_e gebildet. Es gilt:

$$D = \frac{p_d}{p_e} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad 2-8$$

Und für den Reflexionsfaktor R :

$$R = \frac{p_r}{p_e} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad 2-9$$

Zur Minimierung der Schallreflexion müssen folglich Materialien ähnlicher Schallimpedanz gewählt werden.

Die Schwächung von Schallwellen durch Absorption und Streuung

In realen Werkstoffen wird die Schallabschwächung nicht nur von der Durchlässigkeit des Materials bestimmt, sondern auch von der Absorption und der Streuung. Beides zusammen ist die sogenannte Schwächung. Bei der Streuung kommt es zu Reflexionen und Beugungen an Inhomogenitäten. Diese können durch die Filamente entstehen. Im Rahmen der in dieser Arbeit durchzuführenden Versuchen spielt dies jedoch keine weitere Rolle, da bei einem Verhältnis der Korngröße zur Wellenlänge von $1/100$ praktisch keine Auswirkungen erkennbar sind [16, 17].

Die Absorption beschreibt die Umwandlung der Schallenergie in Wärme. Grundsätzlich gilt ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Frequenz und der Absorption. Je höher die Frequenz ist, desto stärker ist die Absorption. Die aus der Schwächung

resultierende Dämpfung des Schallsignals über eine Strecke d lässt sich wie folgt berechnen:

$$p = p_0 e^{-\beta d} \quad 2-10$$

In dieser Exponentialfunktion beschreibt α den Schwächungsfaktor. p_0 beschreibt den Schalldruck zu Beginn der Strecke und p den Schalldruck am Ende der Strecke. Zur Bestimmung des Schwächungsfaktors muss die Gleichung 2-10 nach α umgeformt werden. Es ergibt sich:

$$\beta_{Np} = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{p_0}{p} \right) \quad 2-11$$

Der Schwächungsfaktor wird üblicherweise in Neper (Np) angegeben und hat die Dimension $\left[\frac{Np}{m} \right]$. Neben der Darstellung in Neper ist auch eine Darstellung in Dezibel (db) möglich und wird in $\left[\frac{dB}{m} \right]$ angegeben. Für die Darstellung in Dezibel wird der natürliche Logarithmus durch den dekadischen Logarithmus ersetzt und mit dem Faktor 20 multipliziert.

$$\beta_{dB} = \frac{1}{d} 20 \lg \left(\frac{p_0}{p} \right) \quad 2-12$$

Die in Dezibel angegebenen Schwächungsfaktoren sind in der Größenordnung von eins bis mehreren 100 einzuordnen und erleichtern somit den Vergleich unterschiedlicher Schwächungsfaktoren. [16]

Erzeugung und Detektion

Zur Erzeugung der Ultraschallwellen werden üblicherweise piezoelektrische Werkstoffe verwendet. Diese zeichnen sich durch ihre Fähigkeit aus, mechanische Energie in elektrische umzuwandeln und umgekehrt [18]. Wird ein piezoelektrischer Kristall mechanischer Belastung ausgesetzt, bilden sich elektrische Ladungen auf den Oberflächen des Kristalls. Dies ist der direkte Piezoeffekt. Der umgekehrte Fall wird als inverser Piezoeffekt bezeichnet und beschreibt die mechanische Deformation, die durch eine hinreichend große angelegte Spannung erreicht werden kann [19].

Die physikalische Grundlage hierfür bietet der Aufbau der Elementarzellen von piezoelektrischen Werkstoffen. Dieser Aufbau ist exemplarisch für eine Blei-Zirkonat-Titanat-Keramik (PZT) in der folgenden Abbildung 10 dargestellt. Sie zeigt die PZT-Elementarzelle ober- und unterhalb der Curie-Temperatur (ϑ_c).

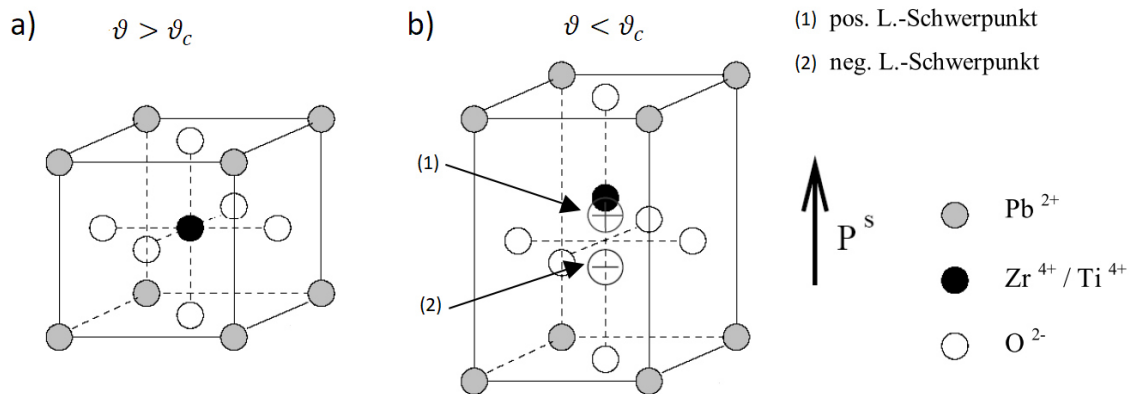


Abbildung 10: Darstellung einer PZT-Elementarzelle in der a) paraelektrischen und der b) ferroelektrischen Phase bei spontaner Polarisation P^s nach [20]

Im ersten Fall a) mit $\vartheta > \vartheta_c$ besitzt die Elementarzelle eine kubische Form und befindet sich in der paraelektrischen Phase. In dieser Form fallen die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladung ineinander. Eine Nutzung des Piezoeffekts ist in diesem Temperaturbereich nicht möglich.

Fall b) zeigt die PZT-Elementarzelle für Temperaturen $\vartheta < \vartheta_c$ und beschreibt die ferroelektrische Phase. In diesem Temperaturbereich bildet sich bei PZT-Keramiken, abhängig von der verwendeten Keramik, ein tetragonales ($PbTiO_3$) oder rhomboedrisches ($PbZrO_3$) Gitter aus. Durch die einhergehende Verschiebung der Ladungsträger wird das Gitter verzerrt und es bildet sich ein Dipol. Dies resultiert in einer spontanen Polarisierung (P^s) der Elementarzelle und das piezoelektrische Verhalten des Werkstoffes kann genutzt werden. [4, 18]

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik bezüglich der Fertigungsüberwachung von Faserverbundkunststoffen aufgezeigt. Insbesondere wird auf die Prüfung via Ultraschall eingegangen. Unter Beachtung der momentanen Grenzen des Standes der Technik wird die Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit definiert.

3.1 Überwachung des Fertigungsprozesses von Faserverbunden

Zur Bestimmung der Laminatdicke eines FVK werden zunächst mögliche Einflussfaktoren identifiziert. *Karkan* stellt in seiner Arbeit [21] eine Auflistung von Wechselwirkungen innerhalb des Aushärteprozesses und mögliche Einflussnahmen dar (vgl. Abbildung 11).

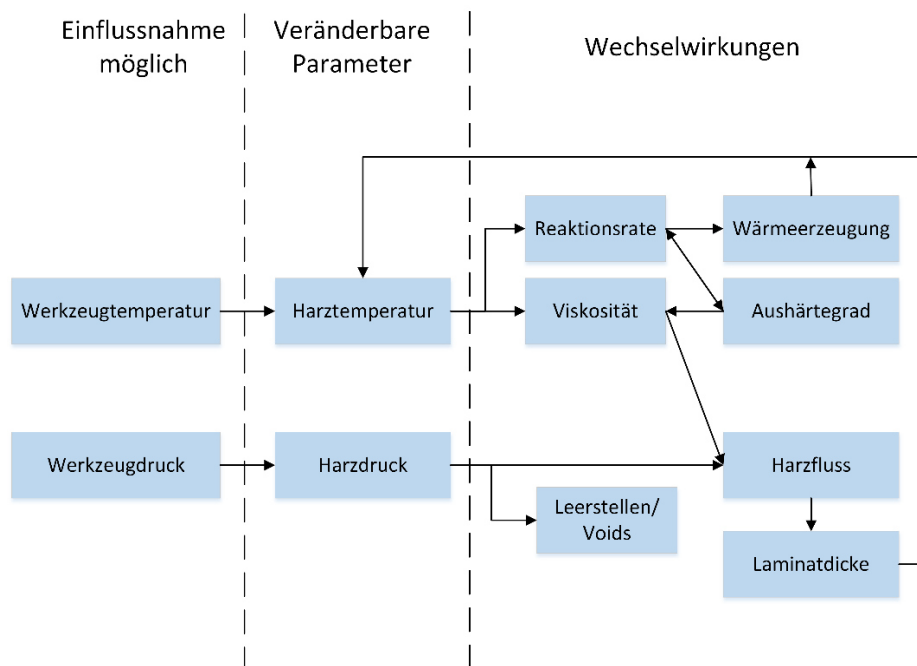


Abbildung 11: Einflüsse auf den Aushärteprozess von FVK (nach [21])

Obwohl *Karkan* weder den Faservolumengehalt noch eine mögliche Schwindung des Matrixmaterials betrachtet, wird dennoch das Zusammenspiel unterschiedlicher Faktoren auf die Laminatdicke verdeutlicht. Es ist nachvollziehbar, dass für eine gezielte Einflussnahme auf den Aushärteprozess, ein vertieftes Wissen über die in Wechselwirkung stehenden Faktoren benötigt wird.

Um an diese Informationen zu gelangen, gibt es verschiedene messtechnische Ansätze, welche unterschiedliche Materialeigenschaften des Verbundes überwachen. Die Tabelle 1 bietet eine Übersicht über verschiedene Sensorsysteme und ihre Eignung zur Bestimmung der Fließfront, des Aushärtegrades, der Leerstellen-Detektion und der Delamination.

Überwachte Materialeigen- schaft	Technologie	Fließfront	Aushärtegrad	Leerstellen (Void) – Detektion	Delami- nation
Elektromag- netismus	Dielektrische Analyse [22]	✓	✓	✓	✓
	Gleichstrom Analyse [23]	✓	✓	-	-
	Elektrische Zeitbe- reichsreflektometrie [24]	✓	✓	-	-
Mechanik	Optische Faserinterfe- rometer [25]	✓	✓	-	-
	Ultraschallsensoren* [17]	✓	✓	✓	✓
Optik	Faser-Bragg-Gitter [26]	✓	✓	-	-
	Spektrometer [27]	✓	✓	-	-
Thermodyna- mik	Thermometer [28]	✓	✓	-	✓
	Druckwandler [29]	✓	-	-	-

* wird in Kapitel 3.2 gesondert betrachtet

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Technologien zur Prozessüberwachung im Faserverbund-kontext inklusive Literaturverweisen (nach [30])

Ein Großteil der vorgestellten Technologien verwenden Sensoren, welche in die FVK integriert werden. Integrierte Sensoren bieten den Vorteil der Überwachung des gesamten Lebenszyklus von FVK. Unter dem Begriff des Structural Health Monitoring gibt es diverse Studien, die beispielsweise optische Fasersensoren nutzen, um eine

periodische Überwachung der FVK zu ermöglichen [31, 32]. Auch die gezielte Anbringung an Stellen, die belastungstechnisch von besonderem Interesse sind, sprechen für die Verwendung von integrierten Sensoren. Gegen die Verwendung von integrierten Sensoren spricht der sogenannte Fremdkörpereffekt [33]. Der Fremdkörpereffekt beschreibt die Schwächung eines Faserverbundes durch Einbringung von Sensoren. Es konnte nachgewiesen werden, dass die mechanischen Eigenschaften des Faserverbundes durch die Einbringung von Sensoren vermindert werden [34, 35]. *Masmoudi* [36] zeigt, dass nicht nur die Wahl des Sensormaterials, sondern auch die Geometrie erhebliche Auswirkungen auf die Grundeigenschaften des Faserverbundes haben. Bei der Verwendung von Piezokeramiken kommt er zum Resultat, dass kleinere Sensoren den Verbund wesentlich geringer schwächen, als größere Sensoren.

Die in dieser Arbeit verwendete Ultraschallsensorik wird nicht in die FVK integriert. Stattdessen findet eine direkte Ankopplung der Sensoren an das Werkzeug statt, wodurch die Oberfläche des FVK unangetastet bleibt. Wie mit Ultraschallsensorik die Laminatdicke des FVK bestimmt werden kann, ist Thema des folgenden Kapitels 3.2.

3.2 Ultraschallbasierte Laminatdickenmessung

Die ultraschallbasierte Laminatdickenmessung ist eine zerstörungsfreie Werkstoffprüfung. Für die Überprüfung von FVK werden zwei verschiedene Prinzipien genutzt. Das Impuls-Echo-Verfahren (IE-) und das Durchschallungsverfahren (DS-) [37]. Die unterschiedlichen Varianten und mögliche Einflüsse auf die Schallgeschwindigkeit werden im Folgenden vorgestellt.

Impuls-Echo-Verfahren

Beim IE-Verfahren wird ein Schallimpuls in das Formwerkzeug eingeleitet. Dieser wird üblicherweise über einen Ultraschallprüfkopf mit Vorlauf und Gehäuse [38] oder über eine Piezokeramik erzeugt (vgl. Kapitel 2.3). Da Piezokeramiken gleichzeitig als Aktuator und Sensor nutzbar sind, reicht ein Sensor für das IE-Verfahren aus. Abbildung 12 stellt den schematischen Aufbau des IE-Verfahrens dar.

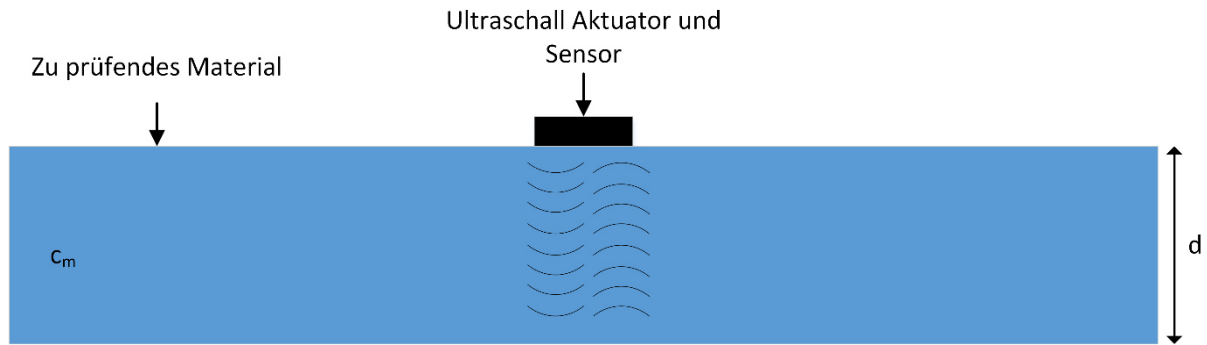


Abbildung 12: Vereinfachte schematische Darstellung des IE-Verfahrens ohne Formwerkzeug

Zur Bestimmung der Laminatdicke kann die Signallaufzeit τ genutzt werden [39, 40]. Sie lässt sich wie folgt bestimmen:

$$\tau_{IE} = \frac{2d}{c_M}$$
$$\triangleq d = \frac{\tau_{IE} \cdot c_M}{2}$$

3-1

Hierbei beschreibt d die Dicke und c_M die Schallgeschwindigkeit des Materials. Aufgrund der Reflexion an der Grenzschicht des zu prüfenden Körpers muss das Schallsignal zwei Mal durch das zu untersuchende Material durchschallen. Einhergehend hiermit kann es bei stark dämpfenden Materialien zu einer starken Abschwächung des Signals kommen. Dieses Verfahren wird neben der Laminatdickenmessung auch häufig zur Fehlstellendetektion verwendet [41].

Durchschallungs-Verfahren

Beim DS-Verfahren werden Ultraschallwellen durch das zu prüfende Material gesendet und auf der gegenüberliegenden Seite empfangen. Hierfür werden zwei Piezokeramiken verwendet, wobei eine als Aktuator und die andere als Sensor auftritt. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 13 dargestellt.

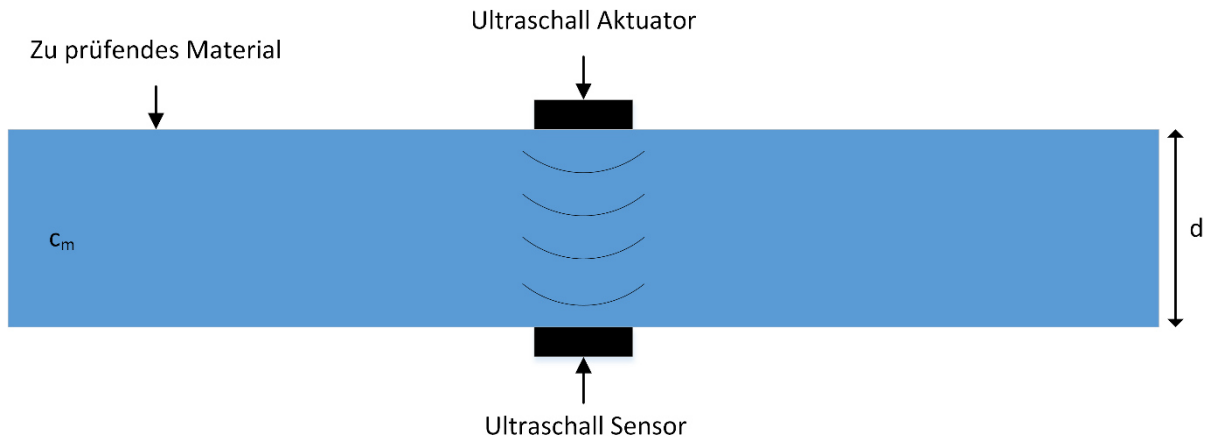


Abbildung 13: Schematische Darstellung des DS-Verfahrens

Analog zur Signallaufzeitberechnung des IE-Verfahrens lässt sich auch beim DS-Verfahren die Signallaufzeit τ_{DS} mit der Dicke d und der Schallgeschwindigkeit c_M des Materials berechnen. Es gilt:

$$\tau_{DS} = \frac{d}{c_M}$$

3-2

$$\triangleq d = \tau_{DS} \cdot c_M$$

In der Praxis finden sich verschiedene Anwendungen des DS-Verfahrens. Meist wird ein fest definierter Abstand zwischen Sensor, Aktuator und Prüfstück gefordert, wobei als Zwischenmedium Wasser oder Luft genutzt wird [42, 43]. Da sich während der Fertigung von FVK die Dicke des Verbundes ändert, kann der geforderte definierte Abstand nicht erhalten bleiben, weshalb sich dieses Verfahren in dieser Form nicht für die exakte Überwachung der Herstellung von FVK eignet.

Weitere kommerziell erhältliche US-Sensoren eignen sich ebenfalls nur bedingt für die Dickenmessung von FVK, da sie stets mit der Schallgeschwindigkeit des zu prüfenden Objektes kalibriert werden müssen. Diese ist bei Faserverbundkunststoffen nicht nur von der Temperatur, sondern insbesondere auch vom Aushärtegrad und des Faser-volumengehalts abhängig und ändern sich während des Aushärteprozesses (siehe Kapitel 2.2).

In der Literatur finden sich zahlreiche Beispiele dafür, dass sich die Schallgeschwindigkeit des Harzsystems in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Aushärtegrad

ändert (z.B. [17, 44, 45]). Sie alle zeigen eine Verkürzung der Reaktionszeit mit zunehmender Temperatur und steigende Schallgeschwindigkeiten mit höherem Aushärtegrad auf. Allerdings wird jeweils nur eine Einflussgröße betrachtet und nicht die Wechselwirkungen zwischen Temperatur und Aushärtegrad untersucht. Des Weiteren finden sich im Stand der Technik kaum Untersuchungen bezüglich der Schallgeschwindigkeitsänderung bei senkrecht auf den vernetzten Faserverbund auftreffenden Longitudinalwellen. Lediglich *Liebers* [46] untersucht diesen Zusammenhang und nutzt diese Daten, um eine Online-Kalibrierung der Schallgeschwindigkeit durchzuführen. Die Grundidee und der dafür entwickelte Versuchsstand werden im Folgenden näher erläutert.

Alternativer Ansatz für das Durchschallungsverfahren

Liebers [46] stellt in seiner Arbeit einen möglichen Ansatz zur open-mould in-situ Laminatdickenmessung für eine Vakuuminfusion mit dem DS-Verfahren vor (vgl. Abbildung 14).

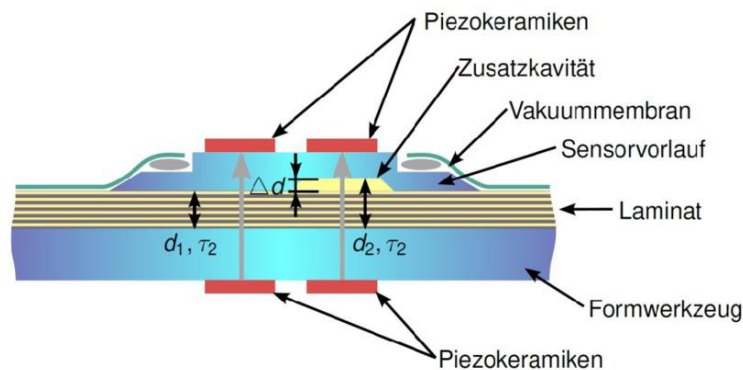


Abbildung 14: Schematische Darstellung eines Versuchsaufbaus zur Online-Dickenmessung [46]

In diesem Aufbau wird durch Hinzugabe eines Sensorvorlaufes mit definierter Zusatzkavität Δd eine Laufzeitmessung ermöglicht, die nicht nur durch den faserverstärkten Bereich, sondern auch durch ein Reinharzgebiet läuft. Es ergeben sich somit zwei Laufzeitmessungen. Für den faserverstärkten Bereich gilt:

$$\tau_1 = \frac{d_1}{c_1} \quad 3-3$$

und für die zweite Messstelle mit Zusatzkavität:

$$\tau_2 = \frac{\Delta d}{c_{Harz}} + \frac{d_1}{c_1} \quad 3-4$$

Somit kann durch die Laufzeitdifferenz $\Delta\tau$ und der Zusatzkavit tsh he Δd die Schallgeschwindigkeit des Reinharzbereiches bestimmt werden. Es gilt:

$$\Delta\tau = \frac{d_2 - d_1}{c_{Harz}} \quad 3-5$$
$$c_{Harz} = \frac{\Delta d}{\Delta\tau}$$

Die Schallgeschwindigkeit des Reinharzbereiches c_{Harz} kann zur Kalibrierung der Schallgeschwindigkeitsberechnung für den FVK genutzt werden. Es wird angenommen, dass das Harz in beiden Bereichen den gleichen Vernetzungsgrad besitzt. Damit soll auf bisher notwendige Kalibriervorrichtungen und auf die Durchführung von Vorversuchen zur Ermittlung der Schallgeschwindigkeit des Verbundes verzichtet werden können [46]. Die Schallgeschwindigkeit des Verbundes $c_{Verbund}$ wird schließlich unter Zuhilfenahme des Kompressionsmoduls $B_{Verbund}$ und der Gleichung 2-4 berechnet, wobei $B_{Verbund}$ wie folgt berechnet wird [17]:

$$B_{Verbund} = \left(\frac{1 - \varphi}{B_{Harz}} + \frac{\varphi}{E_{\perp, Faser}} \right)^{-1} \quad 3-6$$

Hierbei beschreibt $E_{\perp, Faser}$ den E-Modul des verwendeten Verstärkungsmaterials senkrecht zur Faserrichtung.

3.3 Fazit zum Stand der Technik

Obwohl bereits eine Vielzahl von ultraschallbasierten Messmethoden zur Dickenmessung unterschiedlicher Werkstoffe existiert, finden sich kaum Arbeiten die sich auf die Laminatdicken nderung bei der Fertigung von FVK beziehen. Die bereits etablierten Ultraschallpr fger te müssen stets mit der Schallgeschwindigkeit des zu prüfenden Materials kalibriert werden. Erst durch diese Kalibrierung können sie eine Messgenauigkeit von $\pm 0,01mm$ bis $\pm 0.001mm$ erreichen, welche notwendig ist, um die oft hohen Anforderungen an die Fertigungstoleranzen zu erfüllen [40]. Ein weiteres Problem liegt

in der Fertigungsumgebung, unter der FVK hergestellt werden. Hohe Aushärtungstemperaturen von über 200°C und die wechselhaften Temperaturbelastungen senken die Lebenserwartung von existierenden Messsystemen erheblich. Daher wird in dieser Arbeit auf am DLR entwickelte Sensoren zurückgegriffen, die sich unter solchen Fertigungsumgebungen als zuverlässig erwiesen haben [17].

In Kapitel 2.1 wurde bereits erwähnt, dass sich mit der Härtung die mechanischen Eigenschaften des Harzes verändern. Hiermit einhergehend ändert sich auch die Schallgeschwindigkeit des FVK während des Fertigungsprozesses und es kann nicht von einer konstanten Schallgeschwindigkeit ausgegangen werden.

Zur Verwendung des IE- und des DS-Verfahrens muss demnach die aktuelle Schallgeschwindigkeit des Verbundes zu jedem Zeitpunkt bekannt sein. Eine von *Liebers* entwickelte Möglichkeit zur Bestimmung der aktuellen Schallgeschwindigkeit des Verbundes wurde in Kapitel 3.2 vorgestellt. Erste Ergebnisse *Liebers* führten jedoch zum Ergebnis, dass die Laminatdicke mithilfe des vorgeschlagenen Versuchsaufbaus nicht zuverlässig bestimmt werden kann [17, 46]. Dies resultiert wahrscheinlich aus einer nicht exakten Positionierung der Sensoren oder einer nicht parallelaufenden Entfernung des Sensors vom Formwerkzeug während des Aufdickens, wodurch es zu einer Kippung der Sensoren kommt und letztlich die Signallaufzeit verfälscht wird. Darüber hinaus haben sich Fasern in den Reinharzbereich gedrückt, wodurch das Messprinzip nicht wie geplant genutzt werden kann. [17].

Der Ansatz über eine Online-Kalibrierung durch die Zuhilfenahme der Schallgeschwindigkeit im unverstärkten Harzbereich scheint dennoch vielversprechend zu sein und soll im Rahmen dieser Arbeit weiterverfolgt werden. In [17] werden bereits Einflüsse auf die Schallgeschwindigkeit betrachtet. Es findet eine Untersuchung der Einflüsse der Temperatur, des Faservolumengehalts und des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit statt. Allerdings wurden bisher nur wenige Versuche diesbezüglich durchgeführt und es findet auch nur eine separate Untersuchung der Einflüsse statt. Ziel dieser Arbeit ist daher die Erhebung weiterer Messdaten und die Beantwortung der Frage:

Kann die aktuelle Schallgeschwindigkeit eines Faserverbundkunststoffes in Abhängigkeit von Temperatur, Faservolumengehalt und Aushärtegrad mathematisch beschrieben werden?

4 Entwicklung des Versuchsstandes

Im vierten Kapitel wird die Entwicklung des Werkzeuges vorgestellt, welches in dieser Arbeit verwendet wird. Dafür wird zunächst ein Anforderungsprofil erstellt und anschließend auf die technische Umsetzung und die Auslegung eingegangen.

4.1 Anforderungsprofil des Werkzeuges

Bei der Auslegung der Versuchsvorrichtung sind sowohl funktionelle, werkstofftechnische als auch konstruktive Maßnahmen zu beachten. Diese werden im Folgenden erläutert.

Grundfunktionalität

Das Werkzeug soll eine Untersuchung der Auswirkungen der Temperatur, des Faservolumengehalts und des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit ermöglichen. Daher muss eine Variation der genannten Einflussgrößen durch das Werkzeug möglich sein. Darüber hinaus soll die Schallgeschwindigkeit nach *Liebers* [46] berechnet werden (vgl. Kapitel 3.2). Dafür muss eine Ermittlung der Schallgeschwindigkeit im Faserverbundkunststoff und im Reinharzbereich möglich sein. Zur Bestimmung des Aushärtegrades des Matrixsystems muss ebenfalls die Temperatur des FVK zu jedem Zeitpunkt bekannt sein. Eine Messung der Umgebungstemperatur kann das Ergebnis verfälschen, weshalb eine direkte Messung der Temperatur im FVK gefordert wird. Nach Möglichkeit soll das Werkzeug durch eine Person per Hand bedient werden können, ohne der Zuhilfenahme von weiteren Maschinen (zum Beispiel Pressen).

Werkstofftechnische Anforderungen

In dieser Arbeit wird mit dem Harzsystem RTM 6 gearbeitet (siehe Anhang 9.1). Ab einer Temperatur von $\approx 240^{\circ}\text{C}$ tritt bei RTM 6 die Devitrifikation auf. Damit ein möglichst großer Temperaturbereich untersucht werden kann, muss das Werkzeug unter dieser Temperatur noch funktionsfähig sein.

Für ultraschallbasierte Messungen sind die akustischen Eigenschaften des Materials zu beachten. Um zuvor genannten Effekten der Schwächung entgegen zu wirken (vgl.

Kapitel 2.3), sollte das Werkzeug aus isotropem und schwach dämpfendem Material konstruiert werden. Darüber hinaus muss wegen der Verwendung von Epoxidharzen auf die chemische Beständigkeit geachtet werden.

Konstruktive Anforderungen

In Kapitel 3.2 ist das Durchschallungsverfahren vorgestellt worden, welches in dieser Arbeit zur Berechnung der Laminatdicke verwendet werden soll. Bei diesem Verfahren ist die genaue Positionierung der Sensorpaare essentiell. Um Fehlerquellen durch fehlerhafte Positionierung der Sensoren zu minimieren, soll konstruktionsbedingt die Anbringung der Sensoren und deren exakte Positionierung erleichtert werden.

Zur Fertigung der Probekörper soll das (VA)-RTM Verfahren verwendet werden (vgl. Kapitel 2.2). Damit sich das Werkzeug unter dem gegebenen Umgebungsdruck nicht verformt, ist eine ausreichende Steifigkeit des Werkzeuges notwendig. Des Weiteren ist für das (VA)-RTM Verfahren eine zuverlässige Evakuierung der Kavität wichtig. Damit innerhalb der Kavität ein vergleichbarer Aushärtegrad erreicht wird, muss eine schnelle und gleichmäßige Harzinfusion sowie eine homogene Temperaturverteilung gewährleistet sein. Dafür wird ein Anguss konstruiert und die Temperatur an mehreren Stellen gemessen. Zur Herstellung mehrerer Proben, ohne zu starker Beanspruchung des Werkzeuges, muss eine gute Entformbarkeit des Werkzeuges möglich sein. In Abbildung 15 sind die genannten Anforderungen zusammengefasst.

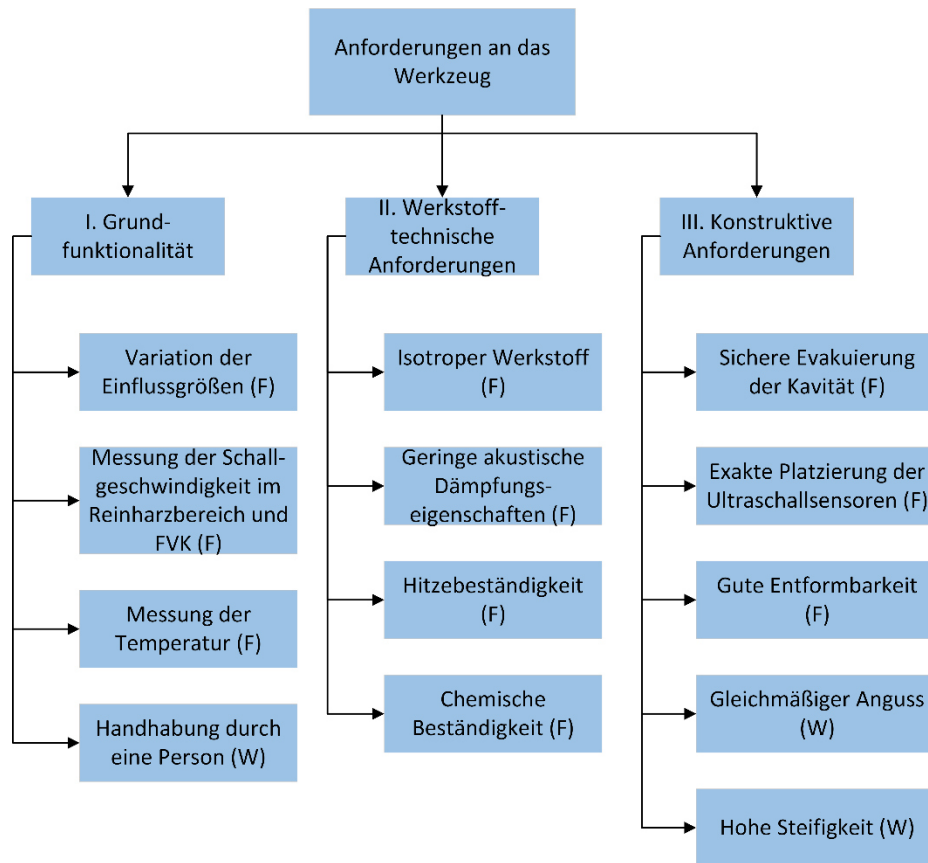


Abbildung 15: Zusammenfassung der Anforderungen an das zu fertigende Werkzeug und Unterteilung in Festanforderungen (F) und Wunschanforderungen (W)

4.2 Technische Umsetzung

Dieses Kapitel befasst sich mit der technischen Umsetzung der zuvor gestellten Festanforderungen.

Grundfunktionalität – Variation der Einflussgrößen

Die zu untersuchenden Einflussgrößen sind die Temperatur, der Aushärtegrad und der Faservolumengehalt. Eine Variation der Temperatur ist unter Einhaltung der Temperaturbeständigkeit des Werkzeugmaterials durch Verwendung eines Ofens problemlos möglich. Die Untersuchung des Aushärtegrades bedarf ebenfalls keiner konstruktiven Maßnahmen, da dieser von der Temperatur und der Zeit abhängig ist.

Zur Variation des Faservolumengehalts gibt es verschiedene Ansätze. Eine Möglichkeit ist die Entwicklung mehrerer Werkzeuge mit unterschiedlicher Kavitätshöhe. Dies

ist jedoch mit hohen Kosten und der Durchführung vieler Versuche verbunden. Außerdem ist die Gewährleistung gleicher Temperaturverhältnisse und gleicher Aushärtegrade versuchsübergreifend mit Messungenauigkeiten verbunden. Eine Alternative ist die Variation der Kavitätshöhe innerhalb eines Werkzeuges. Fertigungstechnisch ist dies, beispielsweise durch das Fräsen von Taschen unterschiedlicher Tiefen, leicht realisierbar (vgl. Abbildung 16) und wurde ähnlich von *Liebers* [17] bereits erfolgreich getestet. Eine technische Umsetzung bei Verwendung eines zweiteiligen Werkzeuges kann folgenderweise aussehen:

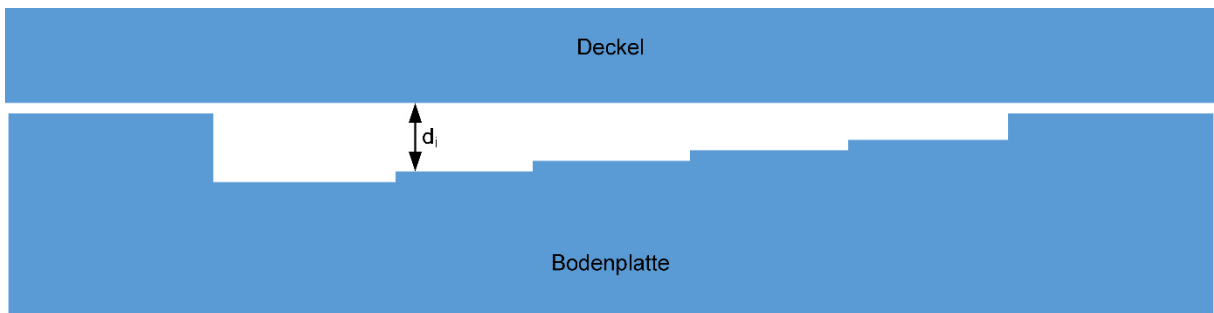


Abbildung 16: Schematische Darstellung eines zweiteiligen Werkzeuges bestehend aus Deckel und Bodenplatte mit unterschiedlicher Kavitätshöhe d_i

In Kapitel 2.1 wurde der Faservolumengehalt erläutert. Eine alternative Berechnungsmethode unter Beachtung der Kavitätshöhe d , des Flächengewichts des Geleges FG_i und der Dichte des Fasermaterials $\rho_{f,i}$ ist durch Gleichung 4-1.

$$\varphi = \frac{1}{d} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{FG_i}{\rho_{f,i}} \quad 4-1$$

Durch Festlegung des Materials und Angabe gewünschter Faservolumengehalte, lässt sich die benötigte Dicke bestimmen. Dadurch kann das Werkzeug so ausgelegt werden, dass festgelegte FVG untersucht werden können.

Das in Abbildung 16 gezeigte zweiteilige Werkzeug, bestehend aus Bodenplatte und Deckel, stellt die Basis des zu entwickelnden Werkzeuges dar.

Grundfunktionalität – Messung der Schallgeschwindigkeit und Temperatur im Reinharz- und im faserverstärkten Bereich

In [46] wird eine Umsetzung zur Messung der Schallgeschwindigkeit im Reinharzbereich und im FVK vorgestellt (vgl. Kapitel 3.2). Aufgrund der Zusatzkavität kommt es konstruktionsbedingt zu einem Einrücken der Fasern in den Reinharzbereich, wodurch die Messungen verfälscht werden. Eine Alternative ist das Freilassen eines Bereiches der Kavität von Fasern, sodass sich ein Reinharzbereich ausbilden kann. In diesem Gebiet entsteht ein Bereich maximaler Permeabilität, der bei der Infusion zuerst gefüllt wird. Durch die gleichbleibende Anzahl an Lagen des Fasermaterial innerhalb der weiteren Abstufungen, steigt der FVG von Stufe zu Stufe. Infolgedessen nimmt die Permeabilität ab. Da der Harzfluss stets in Richtung der höchsten Permeabilität erfolgt, soll hierdurch eine stufenweise Füllung der Kavität erzeugt werden (vgl. Abbildung 17).

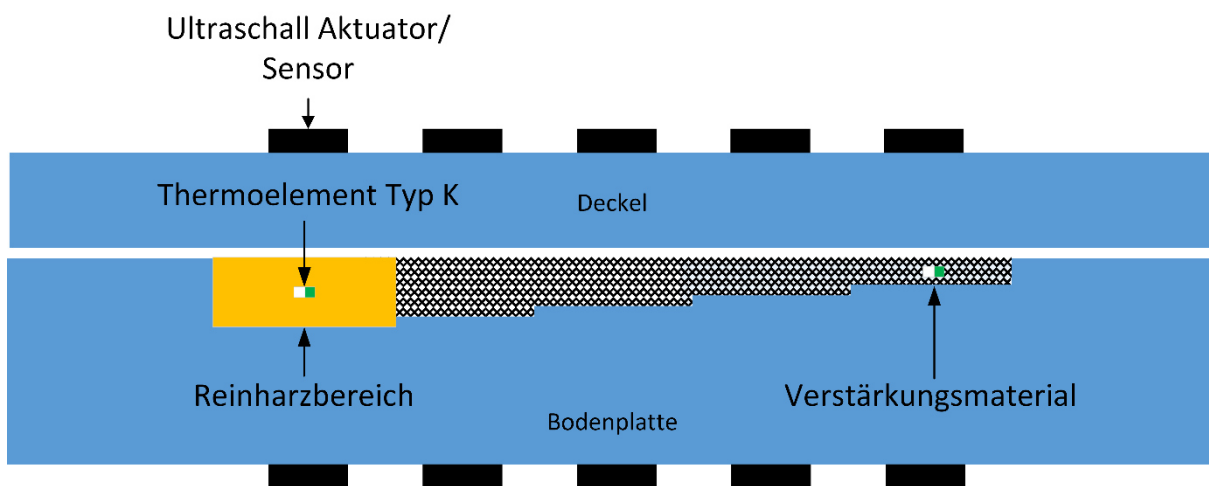


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Messung der Schallgeschwindigkeit und der Temperatur im Reinharzbereich und im FVK

Durch Anbringung von Ultraschallsensoren im faserverstärkten Bereich und im Reinharzbereich, kann die Schallgeschwindigkeit in beiden Bereichen bestimmt werden. Ebenfalls können in beide Bereiche Thermoelemente eingebracht werden, um die Temperatur während des Aushärtprozesses zu überwachen.

Werkstofftechnische Anforderungen

Aufgrund der Forderung eines isotropen und homogenen Materials wird ein Werkzeug aus FVK ausgeschlossen. Die Inhomogenität kann zur Streuung des Signals führen,

was die Auswertung der Messsignale erschwert. Aluminium- und Stahllegierungen hingegen sind homogen, günstig zu erwerben und bei Bedarf einfach zu modifizieren. Da die Schallimpedanz von Aluminium näher an der des Faserverbundes liegt, und somit zu geringerer Reflexion führt (vgl. Kapitel 2.3), wird sich für ein Werkzeug aus Aluminium entschieden (EN AW 5083 [47], siehe Anhang 9.2). Die gewählte Legierung wird als Standardlegierung für Formwerkzeuge beim Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA) genutzt und konnte unter vergleichbaren Bedingungen erfolgreich getestet werden.

Neben dem Werkzeug müssen auch der Dichtring und die Ultraschallsensoren sowie die Fügestelle zwischen Sensor und Werkzeug den Umgebungsbedingungen standhalten. Daher wird ein Viton-Dichtring verwendet, der diesen Anforderungen genügt (vgl. Anhang 9.3). Für die Anbringung der Ultraschallsensoren wird, wie auch zur Fertigung der Proben, RTM 6 verwendet. Bei der Wahl der Ultraschallsensoren ist zu beachten, dass die Curie-Temperatur über der Temperatur der durchzuführenden Versuche liegt, damit der Piezoeffekt genutzt werden kann (vgl. Kapitel 2.3). PIC255 Piezokeramiken der Firma PI besitzen eine Curie-Temperatur von 350°C und werden daher für den Versuchsstand verwendet (siehe Anhang 9.4).

Konstruktive Anforderung – Sichere Evakuierung der Kavität

Beim (VA)-RTM-Verfahren müssen die beiden Werkzeughälften luftdicht verschlossen werden. Eine übliche Methode ist die Verwendung von Dichtringen, die durch eine Verpressung die gefertigte Nut luftdicht verschließen. Da sich beim Arbeiten mit Glas- und Kohlenstofffasern leicht einzelne Fasern zwischen Werkzeug und Dichtring legen können, wird eine doppelte Dichtung gewählt. Dafür wird zum einen die Kavität direkt evakuiert, und zum anderen der Bereich zwischen den beiden Dichtringen. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 18 dargestellt.

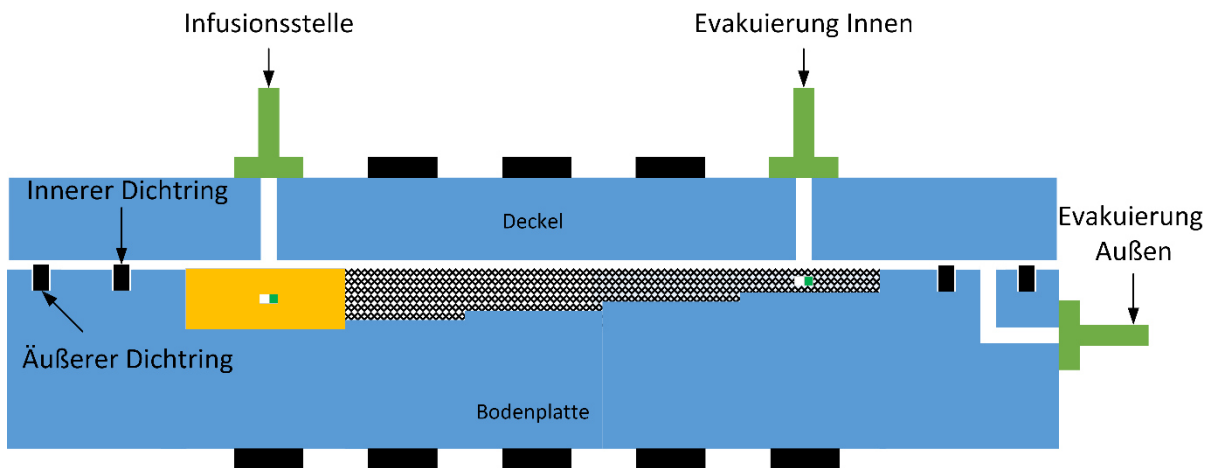


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Werkzeuges inklusive Dichtung, Infusions- und Evakuierungsstellen

Zur Evakuierung zwischen den Dichtringen werden Bohrungen in die Bodenplatte hinzugefügt. Die Evakuierung der Kavität kann durch die Infusionsstelle im Reinharzbereich oder in der niedrigsten Stufe erfolgen.

Konstruktive Anforderung – Exakte Platzierung der Sensoren

Damit die Ultraschallsensoren für das Durchschallungsverfahren möglichst genau zueinander positioniert werden können, werden in den Deckel und die Bodenplatte Aussparungen gefräst, in denen die Ultraschallsensoren befestigt werden können.

Da für die Versuche ein Multiplexer mit 32 Eingängen zur Verfügung steht, werden 16 Ultraschallpaarungen auf 6 verschiedene Stufen aufgeteilt. Exemplarisch wird dies in der Abbildung 19 für den Deckel des Werkzeuges gezeigt.

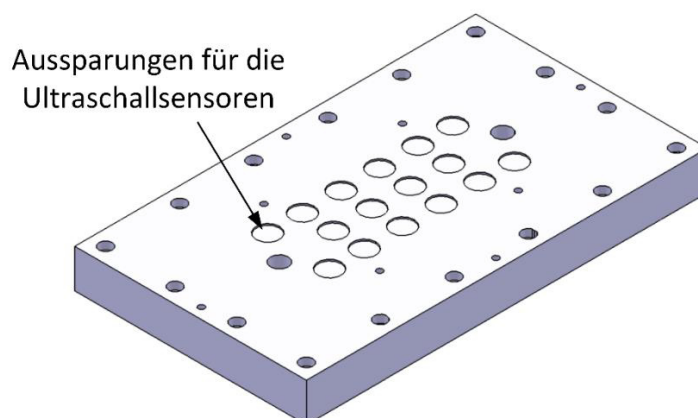


Abbildung 19: Werkzeug-Deckel mit Aussparungen für die Ultraschallsensoren

Die Platzierungen sind der technischen Zeichnung im Anhang 9.6 zu entnehmen.

Konstruktive Anforderung – Gute Entformbarkeit

Zur Gewährleistung der Entformbarkeit des Formwerkzeuges, wird vor jedem Versuch das Werkzeug gereinigt und mit Trennmittel versehen. Als zusätzliche konstruktive Maßnahmen werden Entformungsschrägen mit 92° in die Bodenplatte gefräst, sowie Aussparungen am Rand des Werkzeuges hinzugefügt, sodass bei Bedarf die Werkzeughälften leicht auseinander gehoben werden können (vgl. Abbildung 20).

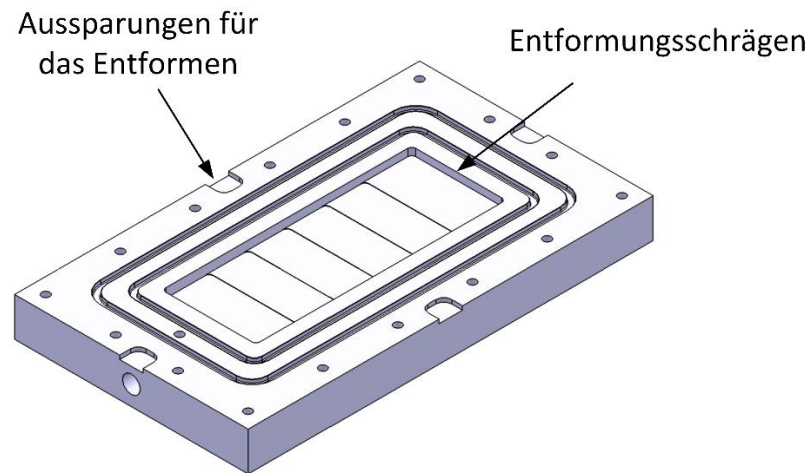


Abbildung 20: Konstruktive Entformungsmaßnahmen an der Bodenplatte

Da die Taschen gefräst werden, besitzen sie bereits fertigungsbedingt eine hohe Oberflächengüte. Darüber hinaus wird die Oberfläche im Kavitätsbereich noch mit einer temperaturbeständigen Schicht versiegelt, sodass auch geringe Rauheiten ausgeglichen werden. Dadurch soll die Gefahr des Verklebens der Probekörper mit dem Formwerkzeug zusätzlich verringert werden.

Finaler Entwurf des Formwerkzeuges

Das Formwerkzeug wird mit sechs Stufen und 16 Sensorpaaren konstruiert. Die Verteilung der Sensoren pro Stufe ist der folgenden Tabelle 2 zu entnehmen.

Stufe i	-	1	2	3	4	5	6
Anzahl der Sensorpaare	-	2	3	3	3	3	2
d_i	[mm]	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75

Tabelle 2: Übersicht der Verteilung der Sensorpaare und Höhen der einzelnen Stufen

Die Verwendung mehrerer Sensorpaare pro Stufe ermöglicht die Erhebung weiterer Messdaten pro eingestelltem Faservolumengehalt. Zum Schutz und zur Organisation der Kabel sowie der Sensoren werden Steckerpanel hergestellt. Der fertige Aufbau des Formwerkzeugs ist in Abbildung 21 schematisch dargestellt.

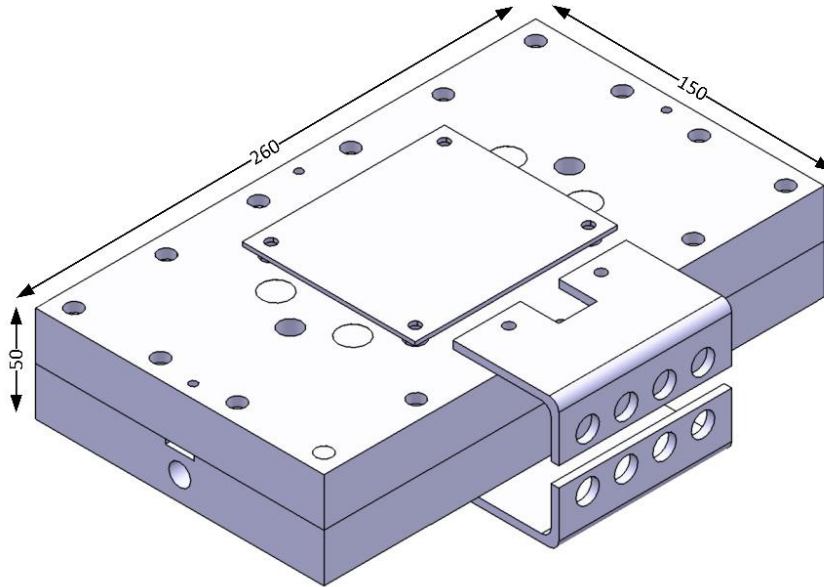


Abbildung 21: Endgültiger Aufbau des Formwerkzeuges und Abmaße

5 Experimenteller Teil

Kapitel 5 befasst sich mit der Planung, Durchführung und der Analyse der Versuchsergebnisse. Die Messungen werden an ausgewählten GFK- und CFK-Messdaten erläutert. Des Weiteren wird die Eignung des in Kapitel 4 entwickelten Versuchsstandes zur Untersuchung der Einflussgrößen Temperatur, Aushärtegrad und Faservolumengehalt überprüft.

5.1 Versuchsplanung und Durchführung

Die Versuche werden mit dem im Kapitel 4 entwickelten Formwerkzeug durchgeführt und die Schallgeschwindigkeit soll nach Gleichung 3-2 für das Durchschallungsverfahren berechnet werden. Die dafür notwendigen Signallaufzeiten werden mit einer am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik entwickelten Software berechnet und zur Verfügung gestellt. Die Dicken werden den gefertigten Proben entnommen.

Vor jedem Versuch muss das Formwerkzeug gereinigt und mit Trennmittel versehen werden. Anschließend findet das Preforming statt, wofür das Verstärkungsmaterial zu $160 \times 60 \text{ mm}$ Lagen zugeschnitten wird. Da das Verstärkungsmaterial in keine komplexe Form gebracht werden muss, findet das Preforming im Formwerkzeug statt. Für die GFK-Probekörper werden sechs Lagen triaxiales Glasfasergelege $[0^\circ, \pm 45^\circ]$ der Firma *SAERTEX* (vgl. Anhang 9.7) verwendet und für die CFK-Probekörper werden abwechselnd je fünf Lagen Triax- $[-45^\circ, 90^\circ, +45^\circ]$ und fünf Lagen Biax-Kohlenstofffasergelege $[\pm 45^\circ]$ der Firma *Toho Tenax* (vgl. Anhang 9.8) genutzt.

Bei beiden Probekörpern wird durch die Hälfte der Lagen ein 2,5mm breites Loch mit einem Locheisen unter der Infusionsstelle gestanzt, durch welches die Thermoelemente (Typ K) geführt werden. Hiermit wird eine Temperaturmessung im FVK ermöglicht. Das zweite Thermoelement wird im Reinharzbereich angebracht. Eine Messbox dient zur Erfassung der Thermoelemente.

Als Matrixmaterial wird RTM 6, ein Ein-Komponenten-Epoxidharz der Firma *HEXCEL* (vgl. Anhang 9.1), verwendet. RTM 6 ist bei Raumtemperatur hochviskos und kaum fließfähig, weshalb es vor jedem Versuch zweieinhalb Stunden bei 80°C aufgewärmt

wird. Die Viskosität sinkt und eine Injektion kann stattfinden. Vorversuche haben gezeigt, dass eine Druckdifferenz von $\approx 1\text{bar}$ ausreicht, um die Kavität komplett zu füllen. Ein angelegtes Vakuum reicht daher aus und es kann bei der Fertigung der Proben auf einen Nachdruck verzichtet werden.

Der Messaufbau zur Auswertung der Ultraschallsensordaten ist *Liebers* [17] entnommen. Durch den 32-Kanäle Multiplexer wird die Auswertung der sechzehn Ultraschallpaarungen ermöglicht. Die stufenweise Zuordnung der Kanäle ist Tabelle 3 zu entnehmen:

Stufe	-	1	2	3	4	5	6
Dicke [mm]	-	4,5	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75
Kanal	-	2, 4	6, 8, 10	12, 14, 16	18, 20, 22	24, 26, 28	30, 32

Tabelle 3: Stufenweise Zuordnung der Kanäle des Multiplexers

Jeder Kanal setzt sich dabei aus einem auf der Bodenplatte des Formwerkzeuges befestigten Sensor (S1, S3, S5, ...) und dem auf dem Deckel gegenüberliegenden Sensor (S2, S4, S6, ...) zusammen.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 22 schematisch zusammengefasst.

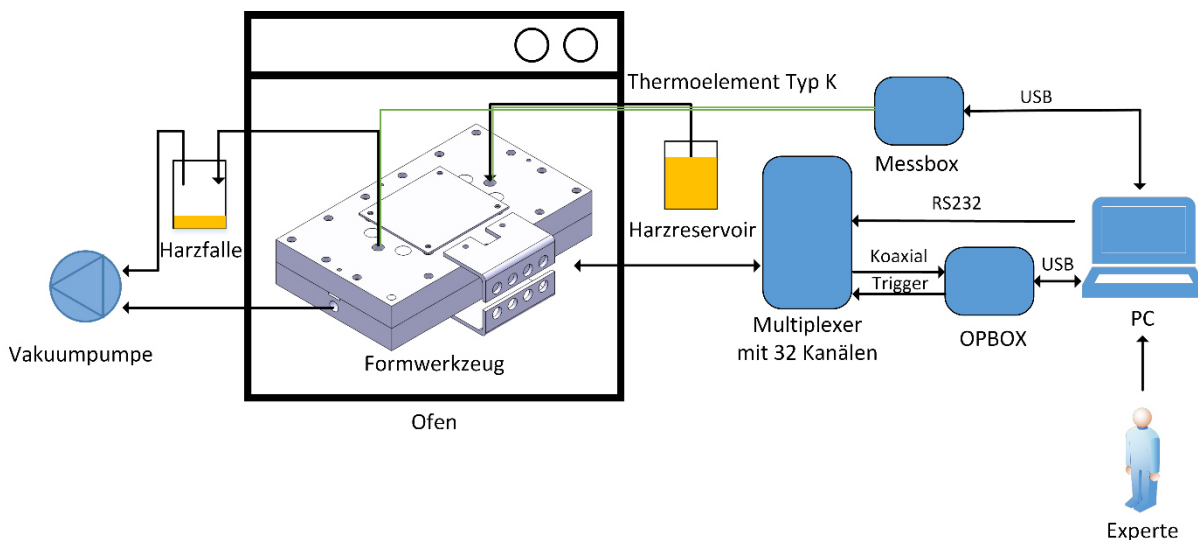


Abbildung 22: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (Messaufbau nach [17])

Insgesamt werden zehn Versuche für das Glasfasermaterial und fünf Versuche für das Kohlenstofffasermaterial durchgeführt. Die Unterschiede sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Bezeichnung	Verstärkungsmaterial	Temperatur [°C]	Temperierung	Bemerkung
GFK-120-01	Glasfasergelege	120	Dynamisch	Hohe Dauer bis zum Erreichen der Zieltemperatur
GFK-120-02	Glasfasergelege	120	Isotherm	-
GFK-120-03	Glasfasergelege	120	Isotherm	Lufteinschlüsse im Reinharzbereich
GFK-130	Glasfasergelege	130	Isotherm	Inklusive Reinharztemperaturmessung
GFK-140	Glasfasergelege	140	Isotherm	-
GFK-150	Glasfasergelege	150	Isotherm	Lufteinschlüsse im Reinharzbereich
GFK-160	Glasfasergelege	160	Isotherm	-
GFK-170	Glasfasergelege	170	Isotherm	Lufteinschlüsse im Reinharzbereich
GFK-180	Glasfasergelege	180	Isotherm	-
GFK-190	Glasfasergelege	190	Isotherm	Inklusive Reinharztemperaturmessung
CFK-120	Kohlenstofffasergelege	120	Isotherm	Entformungsprobleme → Probe zerstört
CFK-130	Kohlenstofffasergelege	130	Isotherm	-
CFK-140	Kohlenstofffasergelege	140	Isotherm	Inklusive Reinharztemperaturmessung
CFK-160	Kohlenstofffasergelege	160	Isotherm	Entformungsprobleme → Probe teilweise zerstört
CFK-170	Kohlenstofffasergelege	170	Isotherm	Inklusive Reinharztemperaturmessung

Tabelle 4: Übersicht der durchgeführten Versuche inklusive Anmerkungen

5.2 Analyse der Messergebnisse

Für jeden Versuch werden Messdaten von sechzehn Ultraschallsensorpaaren ausgewertet. Exemplarisch wird die Schallgeschwindigkeitsentwicklung am Beispiel des Versuches GFK-120-02 im faserverstärkten Bereich (Kanal 2) und im Reinharzbereich (Kanal 30) erläutert. Alle Versuche zeigen qualitativ vergleichbare Verläufe auf.

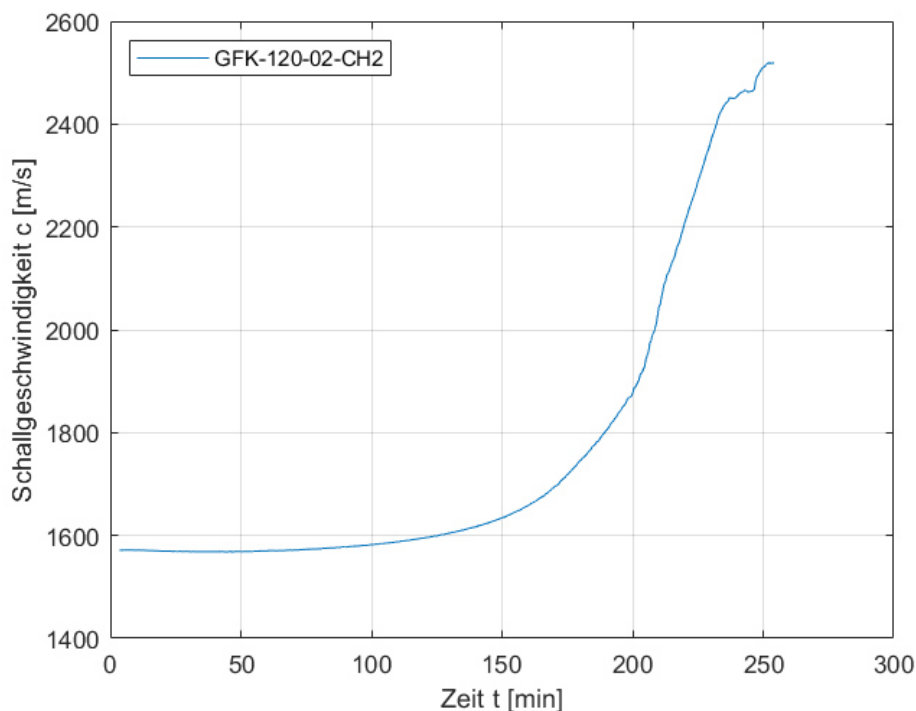


Abbildung 23: Entwicklung der Schallgeschwindigkeit im Versuch GFK-120-02 (isotherm) im faserverstärkten Bereich (Kanal 2)

In den ersten 90 Minuten bleibt die ermittelte Schallgeschwindigkeit nahezu konstant. Anschließend findet ein Anstieg der Schallgeschwindigkeit statt. In Kapitel 2.1 wurde anhand des TTT-Diagramms erläutert, dass Epoxidharze während des Aushärtprozesses unterschiedliche morphologische Zustände durchlaufen. Diese verändern die thermomechanischen Eigenschaften des Matrixsystems. Der Anstieg der Schallgeschwindigkeit deutet auf solch einen Zustandswechsel hin und beschreibt vermutlich den Übergang vom flüssigen zum gelartigen Sol. Nach etwa 215 Minuten ist ein Wendepunkt erkennbar, was zu einem leichten Abfall der Steigung der Schallgeschwindigkeit führt. Im späteren Verlauf ist bis zum Signallabbruch kein signifikanter Unterschied im Verlauf der Funktion zu erkennen.

Im Folgenden wird die Schallgeschwindigkeitsentwicklung im Reinharzbereich (Kanal 30) betrachtet.

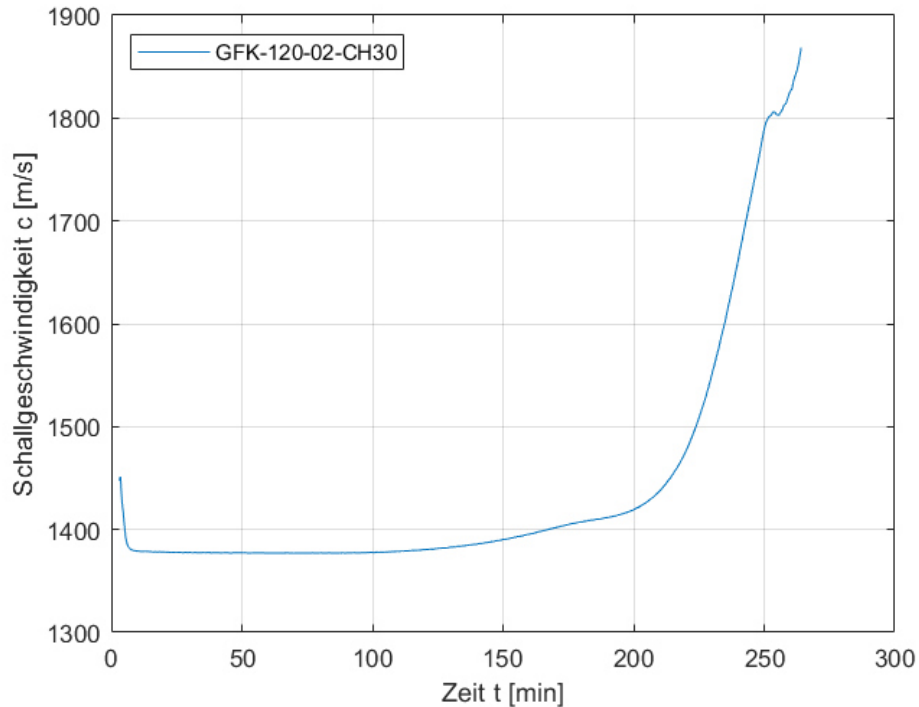


Abbildung 24: Entwicklung der Schallgeschwindigkeit im Versuch GFK-120-02 (isotherm) im Reinharzbereich (Kanal 30)

Zu Beginn des Versuches findet eine Verringerung der Schallgeschwindigkeit statt. Dies ist durch die Nähe der Messung zur Infusionsstelle erklärbar. Das Harz wird vor der Infusion 80°C erwärmt und das Werkzeug besitzt eine Temperatur von 120°C. Durch die zusätzliche Erwärmung des Harzes sinken dessen Viskosität und das Kompressionsmodul. Einhergehend hiermit findet die Verringerung der Schallgeschwindigkeit statt. Der verbleibende Verlauf ist qualitativ mit der Messung des zweiten Kanals vergleichbar. An Messstellen, die weiter von der Infusionsstelle entfernt sind, hat sich das Harz bereits am Werkzeug und Verstärkungsmaterial erwärmt, weshalb dieser Effekt dort nicht mehr zu beobachten ist.

Im direkten Vergleich der beiden Messungen lassen sich quantitative Unterschiede feststellen (siehe Abbildung 25).

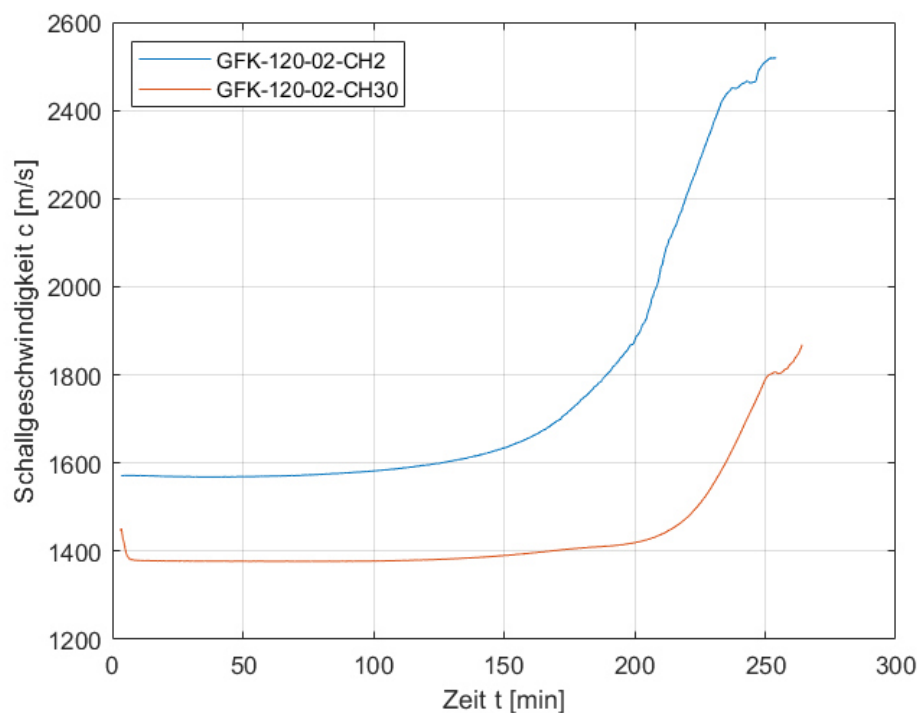


Abbildung 25: Vergleich der Schallgeschwindigkeitsentwicklung des GFK-120-02 Versuches im faserverstärkten Bereich (Kanal 2) und im Reinharzbereich (Kanal 30)

Auffällig ist der Unterschied der ermittelten Schallgeschwindigkeiten. In Kapitel 2.3 wurde die Berechnung für die longitudinale Schallgeschwindigkeit vorgestellt (Gleichung 2-3). Vergleicht man den E-Modul von ausgehärtetem RTM 6 (2700-3300 MPa [2]) mit dem von Glasfasern (73000 MPa [2]), lässt sich dieser Unterschied durch den höheren E-Modul des Verbundes erklären. Eine weitere Abweichung liegt im Zeitpunkt des Anstieges der Funktionskurven. Im Reinharzbereich findet der Anstieg bei ungefähr 210 Minuten statt. Im faserverstärkten Bereich bereits nach 110 Minuten. Da das Formwerkzeug eine Temperatur von 120°C besitzt, lässt sich diese Differenz nicht durch unterschiedliche Temperierungen erklären. Eine Vermutung ist, dass der Reinharzbereich mehr Zeit zum Erreichen des gleichen Vernetzungsgrades benötigt. Dies kann aus den unterschiedlichen Harzmengen in den verschiedenen Stufen resultieren. Darüber hinaus ist das Fasermaterial ebenfalls auf 120°C erhitzt. Daraus folgt, dass bei höheren Faservolumengehalt das einströmende Harz über eine größere Oberfläche schneller erwärmt wird, wodurch sich der frühere Anstieg des Funktionsgraphen erklären lässt.

Trotz der quantitativen Unterschiede ist der Abbruchzeitpunkt des Durchschallungssignals bei beiden Kanälen ähnlich. Es muss daher überprüft werden, warum es zu einem Abbruch des Durchschallungssignals kommt.

Abbruch der Durchschallungssignals

Zur Untersuchung des Signalabbruchs werden die Messdaten im Reinharzbereich (Kanal 30) aller isothermen GFK Versuche untersucht. Dafür werden die aufgezeichneten Amplitudenverläufe der Ultraschallsensoren überprüft. Exemplarisch wird dies für den Versuch GFK-120-02 dargestellt.

Abbildung 26 stellt den Amplitudenverlauf des DS-Verfahrens zum Zeitpunkt des Signalabbruchs dar.

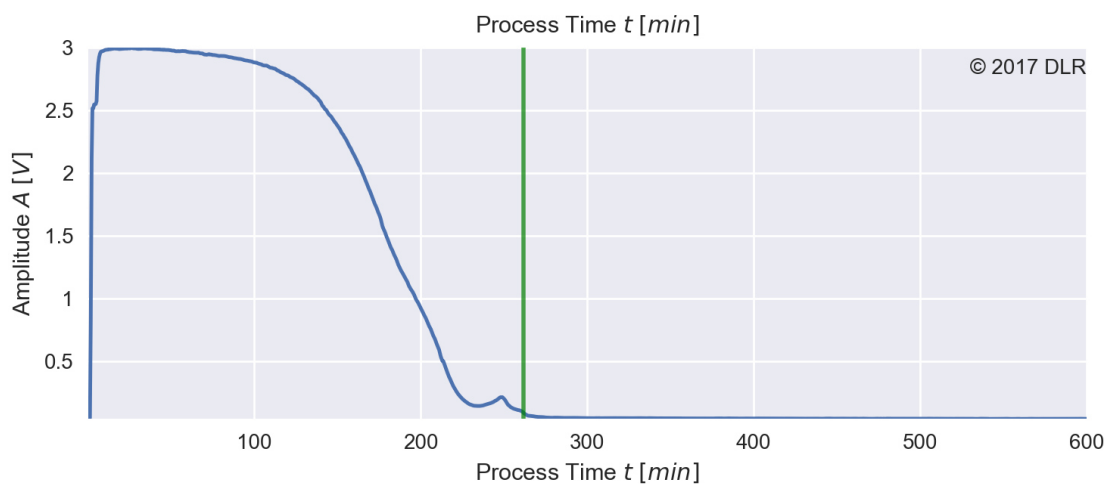


Abbildung 26: Amplitudenverlauf des DS-Verfahrens im Versuch GFK-120-02 (Kanal 30) zum Zeitpunkt des Signalabbruchs

Der Amplitudenverlauf nähert sich nach 247 Minuten gegen null. Ab diesem Zeitpunkt findet keine Durchschallung mehr statt. Eine Möglichkeit hierfür kann das Loslösen des Probekörpers vom Formwerkzeug sein. Dies kann durch die Erhöhung der Dichte des Harzes beim Glasübergang und den damit verbunden Volumenschwund entstehen. Das entstehende Vakuumgebiet würde die Übertragung von Schall verhindern.

Diese Annahme wird durch Analyse des Amplitudenverlaufes des Impuls-Echo-Verfahrens überprüft (siehe Abbildung 27).

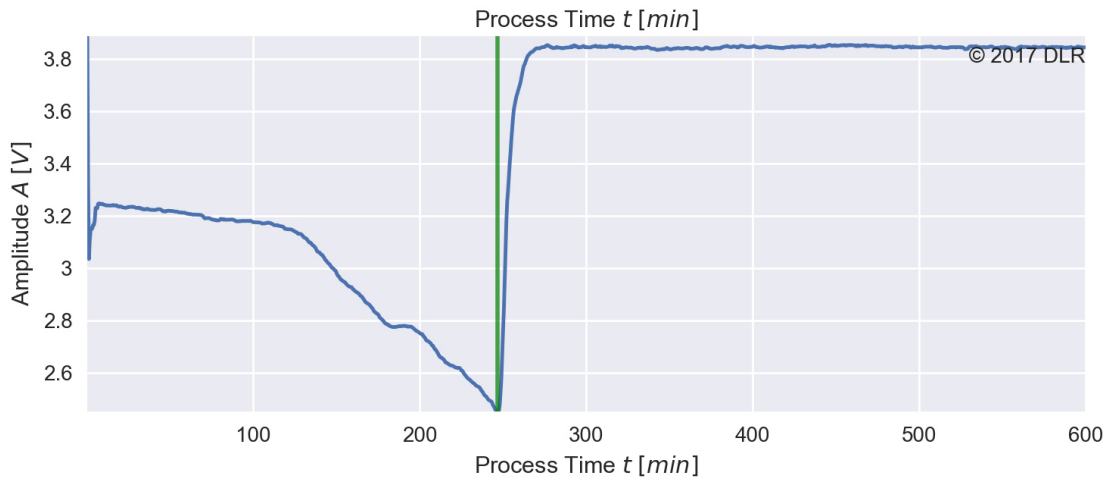


Abbildung 27: Amplitudenverlauf des IE-Verfahrens (Sensor 29) im Versuch GFK-120-02 (Kanal 30) zum Zeitpunkt des Signalabbruchs

Der Amplitudenverlauf des Impuls-Echo-Verfahrens zeigt einen deutlichen Anstieg zum Zeitpunkt des Signallabbruchs. Dies deutet auf eine Reflexion des Schallsignals an einer Grenzschicht hin (siehe Kapitel 3.2), wodurch die Theorie der Loslösung vom Formwerkzeug bekräftigt wird.

Für die weiteren Versuche werden die Signalabbruchzeiten ebenfalls bestimmt. Alle Signalabbruchzeiten sind in folgender Abbildung 28 zusammengefasst.

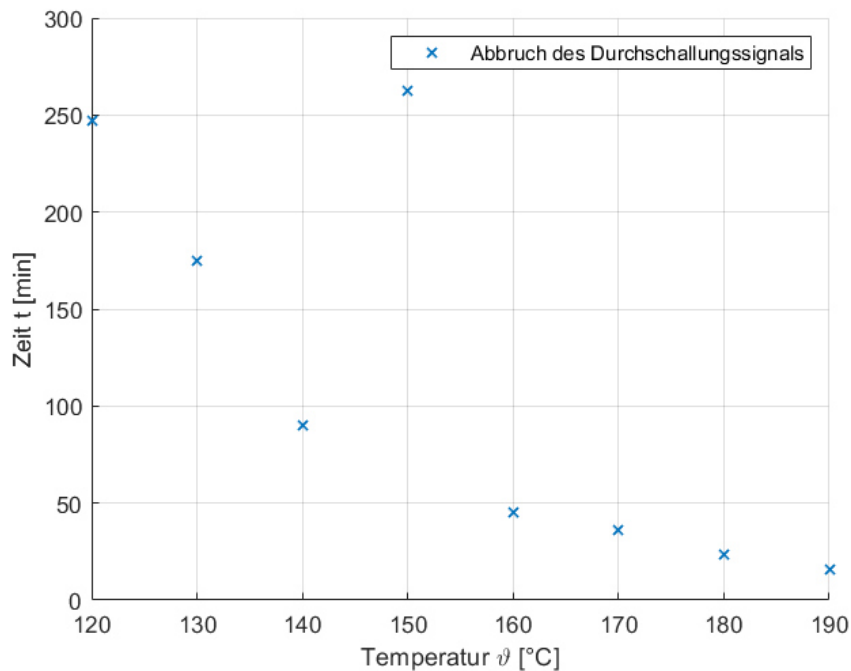


Abbildung 28: Abbruchzeiten des Durchschallungssignals im Reinharzbereich (Kanal 30) der GFK-Versuchsreihe

Mit Ausnahme der Signalabbruchzeit für den Versuch GFK-150 ist eine Verringerung der Signalabbruchszeit zu erkennen. Es scheint ein direkter Zusammenhang zur Aushärtetemperatur zu bestehen. Ein Vergleich mit den am FA durchgeführten isothermen Rheometermessungen zur Bestimmung von Gelzeit und Vitrifikationspunkt zeigt, dass die ermittelten Zeiten nahe der Vitrifikationslinie liegen (vgl. Abbildung 29).

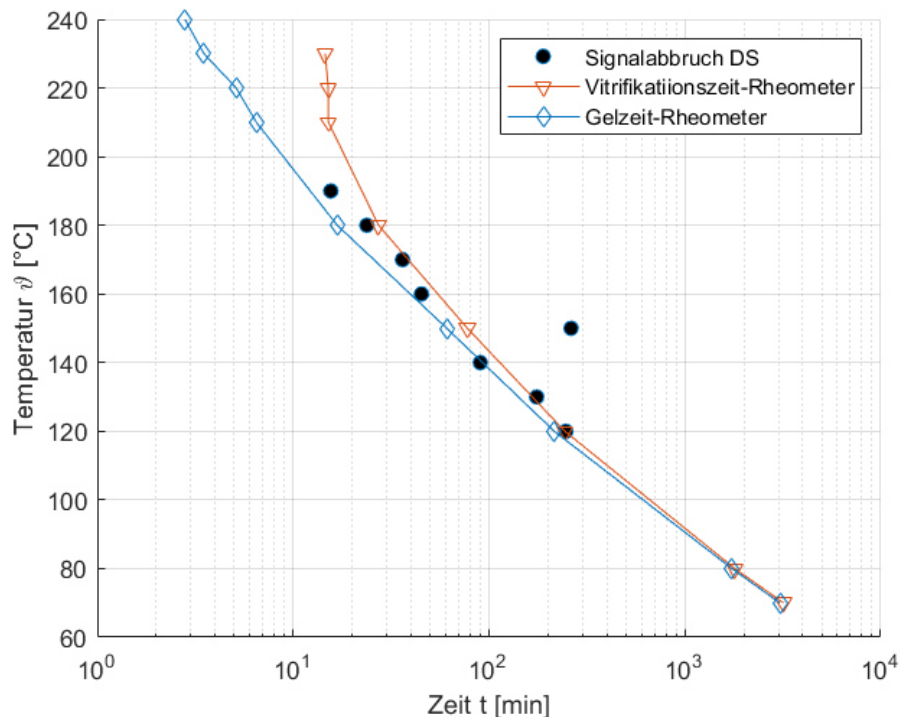


Abbildung 29: Gelzeit und Vitrifikationspunkt von RTM 6 bei isothermer Temperierung und gemessene Signalabbruchzeiten der GFK-Proben [45]

Es wird daher die Annahme getroffen, dass der Signalabbruch aus der Vitrifikation resultiert.

Art der Temperierung

Um die Einflüsse der Temperierung auf die Schallgeschwindigkeit zu untersuchen, werden zwei GFK-Proben bei 120°C hergestellt. Eine wird dynamisch (GFK-120-01) und eine isotherm (GFK-120-02) ausgehärtet.

In GFK-120-01 findet zunächst eine Erwärmung des Formwerkzeuges auf 80°C statt. Anschließend wird die Harzinfusion eingeleitet. Im nächsten Schritt wird die Ofentemperatur auf 120°C erhöht. Der Temperaturverlauf innerhalb des faserverstärkten Bereiches, inklusive erreichbarem Aushärtegrad, wird in Abbildung 30 dargestellt. Für die

Berechnung des Aushärtegrades wird ein am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik entwickeltes Modell verwendet [48].

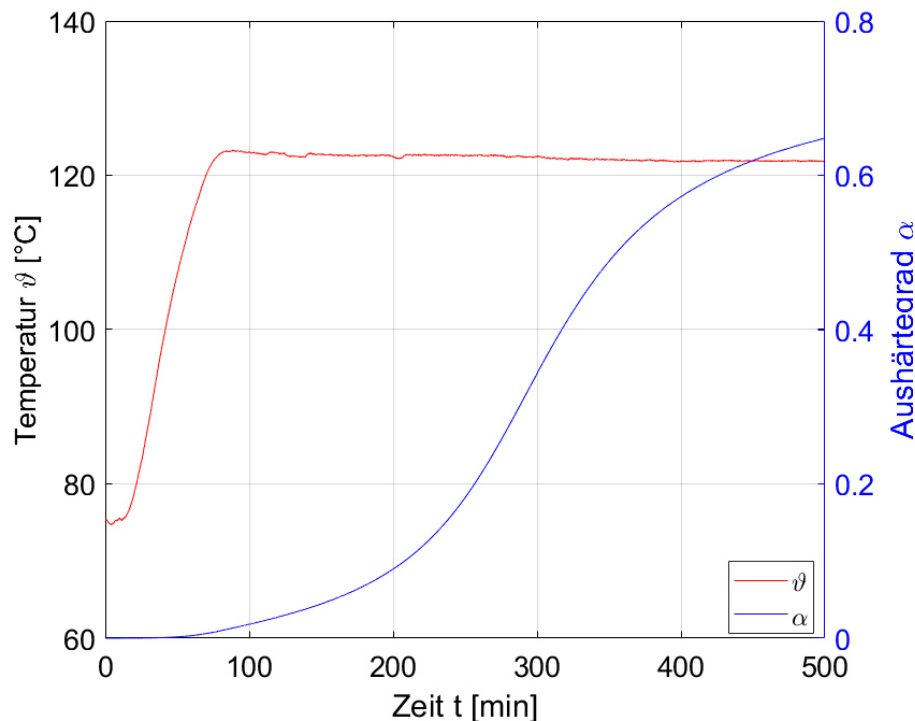


Abbildung 30: Zeitliche Veränderung des Temperaturverlaufs (rot) und des Aushärtegrades (blau) im Versuch GFK-120-1

Für die Erwärmung des Formwerkzeuges von 80°C auf 120°C benötigt der verwendete Ofen 70 Minuten. Die Dauer ist von der spezifischen Wärmekapazität der Materialien, der Dimensionierung des Versuchsstandes sowie der Leistung des Ofens abhängig. Da bei höheren Temperaturdifferenzen mehr Zeit für das Erhitzen benötigt wird, kann die Vitrifikation des Harzes eintreten, bevor die gewünschte Soll-Temperatur erreicht ist. Zur Erhebung von Messdaten unter reproduzierbaren Bedingungen ist die dynamische Temperierung daher nicht geeignet.

Die Wahl der Temperierung hat darüber hinaus Einfluss auf die gemessenen Schallgeschwindigkeiten. Exemplarisch werden an dieser Stelle der Reinharzbereich (Stufe 6/Kanal 30) und der Bereich höchsten Faservolumengehalts (Stufe 1/Kanal 2) untersucht. Die Schallgeschwindigkeitsverläufe des zweiten Kanals sind in Abbildung 31 zu sehen.

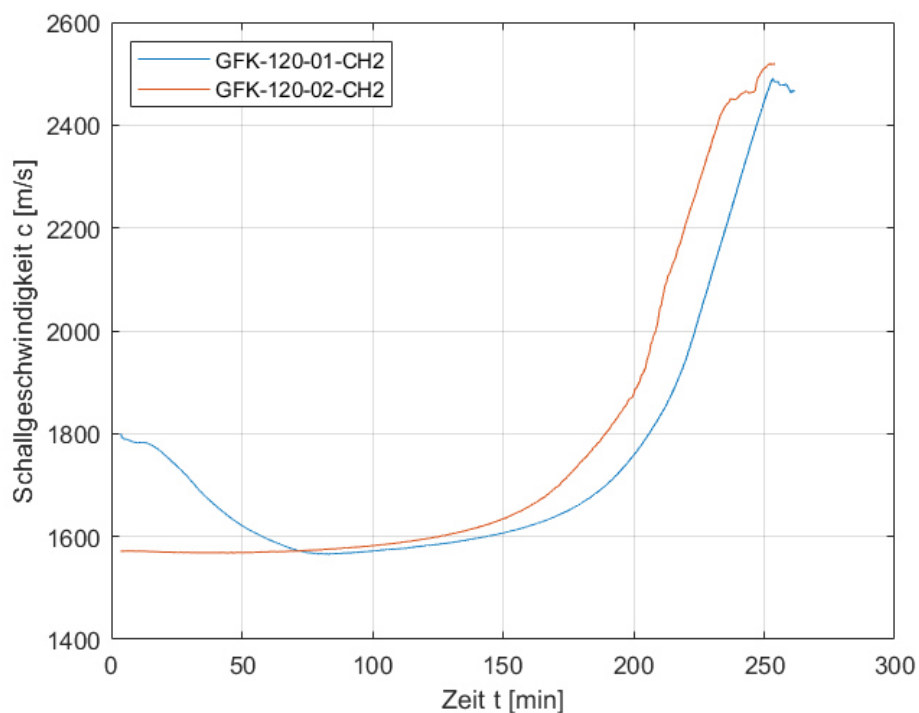


Abbildung 31: Vergleich der Schallgeschwindigkeitsentwicklung der Versuche GFK-120-1 (blau) und GFK-120-2 (orange) im Bereich höchsten FVG (Stufe 1/Kanal 2)

Während bei der isothermen Temperierung (orangener Verlauf) zu Beginn eine konstante Schallgeschwindigkeit vorliegt, kommt es bei der dynamischen Temperierung (blauer Verlauf) zunächst zu einem Abfall der Schallgeschwindigkeit. Dieser resultiert aus der temperaturbedingten Abnahme der Viskosität und dem verringerten Kompressionsmodul (vgl. Gleichung 2-4). Nach 70 Minuten ist das Formwerkzeug ebenfalls auf 120°C erhitzt und es findet ein zeitlich verschobener Verlauf der Entwicklung der Schallgeschwindigkeit statt. Die Abbruchzeiten unterscheiden sich geringfügig. Für den Versuch GFK-120-01 findet der Signalabbruch nach 261,3 Minuten statt und für GFK-120-02 nach 254,1 Minuten.

Im Folgenden wird die Schallgeschwindigkeitsentwicklung im Reinharzbereich untersucht (Abbildung 32).

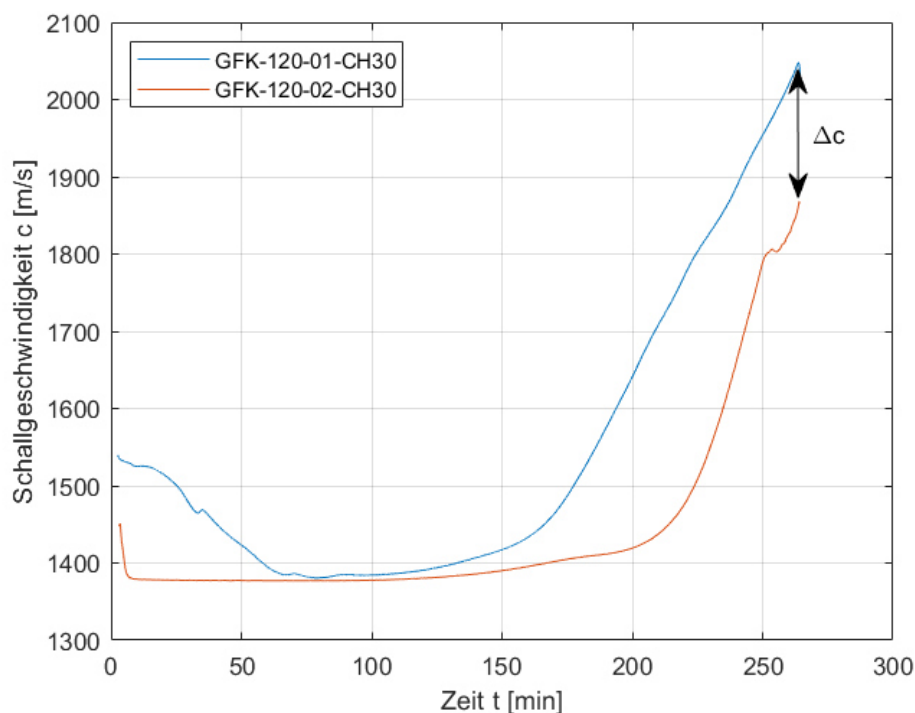


Abbildung 32: Vergleich der Schallgeschwindigkeitsentwicklung der Versuche GFK-120-01 (blau) und GFK-120-02 (orange) im Reinharzbereich (Stufe 6/Kanal 30)

Im GFK-120-01-Versuch (blau) ist ein vergleichbarer Verlauf wie in Kanal 2 zu erkennen. Die Besonderheiten des GFK-120-02-Versuchs wurden bereits zu Beginn des Kapitels erarbeitet.

Nach 260 Minuten bricht das Durchschallungssignal auf Grund der Vitrifikation bei beiden Versuchen ab. Zu diesem Zeitpunkt werden versuchsübergreifend unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten im Reinharzbereich gemessen (Δc). Dies kann aus der unterschiedlichen Temperierung entstehen. RTM6-Harzuntersuchungen des FA haben ergeben, dass sich der ermittelte E-Modul von RTM 6 bei unterschiedlicher Aushärtungstemperatur und ohne zusätzliches Tempnern signifikant unterscheidet. Bei niedrigerer Aushärtetemperatur werden höhere E-Module ermittelt. Die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten können somit aus der geringeren durchschnittlichen Aushärtetemperatur resultieren.

Insgesamt ist die dynamische Temperierung zur Erstellung reproduzierbarer Messergebnisse im Kontext dieser Arbeit nicht geeignet, weshalb weitere Versuche isotherm ausgehärtet werden.

Im Folgenden wird überprüft, ob bei der isothermen Aushärtung Unterschiede im Reinharz- und faserverstärkten Bereich bezüglich der Temperaturentwicklung auftreten und welche Auswirkungen dies auf den Aushärtegrad hat.

Vergleich des Aushärtegrades im Reinharz- und faserverstärkten Bereich

RTM 6 härtet über eine exotherme Reaktion aus (siehe Kapitel 2.2). Die freigegebene Wärmeenergie ist von der Harzmenge abhängig. Im entwickelten Versuchsstand werden FVK-Proben mit unterschiedlichem FVG gefertigt, weswegen der Einfluss der Exothermie anhand von Temperaturmessungen im Reinharz- und im faserverstärkten Bereich untersucht wird. Aus den Verläufen der Aushärtetemperaturen werden die Aushärtegrade bestimmt. Es wird hierbei die Zeit bis zum Abbruch des Durchschallungssignals betrachtet. Exemplarisch werden die Versuche GFK-130 und GFK-190 dargestellt.

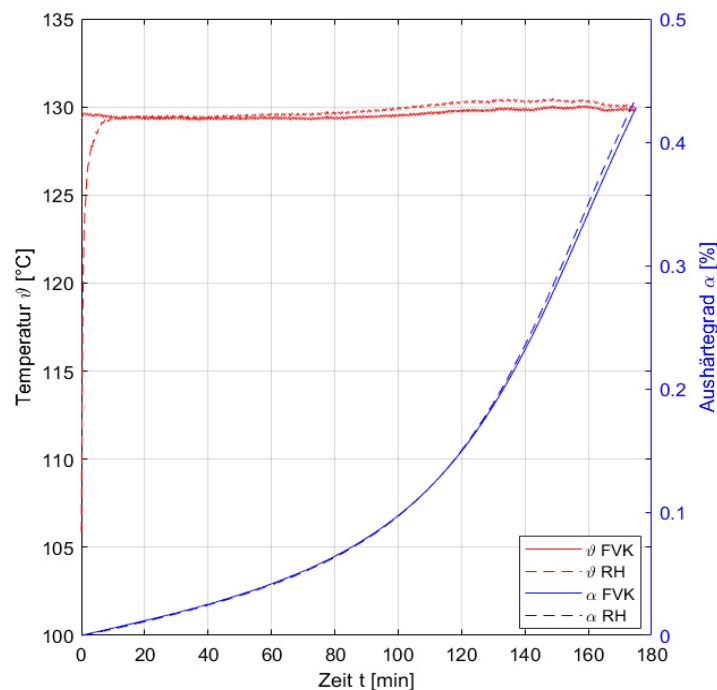


Abbildung 33: Vergleich des Temperaturverlaufes und des Aushärtegrades im Versuch GFK-130 im faserverstärkten Bereich (FVK) und im Reinharzbereich (RH)

Abbildung 33 stellt die Temperaturverläufe und die Aushärtegrade des Reinharzbereiches und des faserverstärkten Bereiches im Versuch GFK-130 dar. Zum Beginn der Infusion ist eine verringerte Temperatur im Reinharzbereich von $\vartheta_{GFK} - \vartheta_{RH} = 30^\circ\text{C}$ erkennbar. Nach 17 Minuten erreicht das Reinharzgebiet die Zieltemperatur von

130°C. Qualitativ sind kaum Unterschiede zwischen den Aushärtegraden α_{FVK} und α_{RH} zu erkennen. Zur Bestimmung der maximalen Differenz des Aushärtegrades $\Delta\alpha_{max}$ wird daher die Differenz von α_{RH} und α_{FVK} zu jedem Zeitpunkt t_i bis zum Signalabbruch $t_{abbruch}$ bestimmt. Daraus ergibt sich:

$$\Delta\alpha_{t_i} = |\alpha_{t_i,RH} - \alpha_{t_i,FVK}|, t_i \leq t_{abbruch} \quad 5-1$$

Die maximale Differenz des Aushärtegrades $\Delta\alpha_{max}$ ist folglich:

$$\Delta\alpha_{max} = \max(\Delta\alpha_{t_i}) \quad 5-2$$

Für den Versuch GFK-130 ergibt sich eine Abweichung $\Delta\alpha_{max,130}$ von 0,81%.

Im Folgenden findet die Auswertung analog für GFK-190 statt (siehe Abbildung 34).

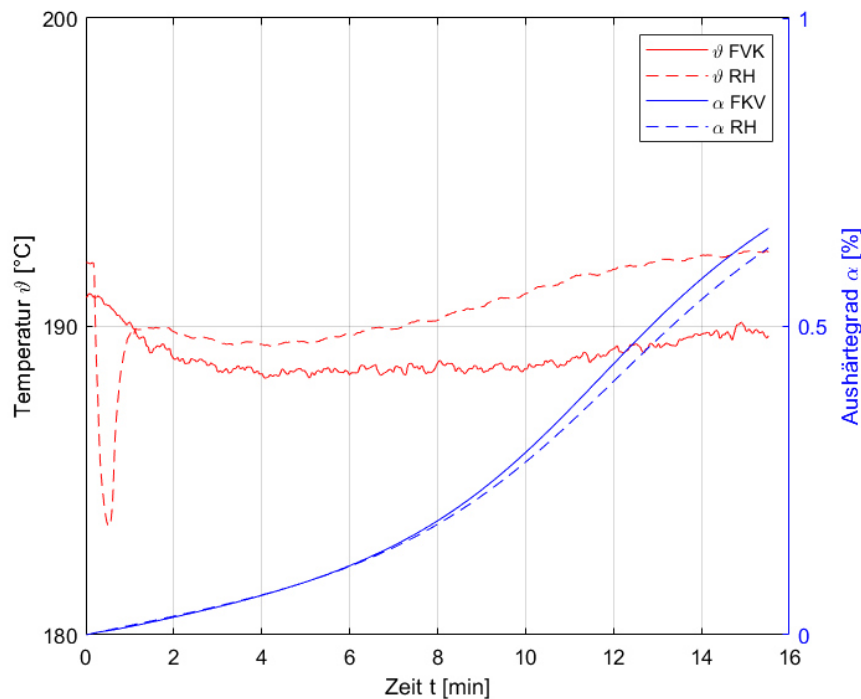


Abbildung 34: Vergleich des Temperaturverlaufes und des Aushärtegrades im Versuch GFK-190 im faserverstärkten Bereich (FVK) und im Reinharzbereich (RH)

Im Versuch GFK-190 findet ebenfalls ein Abfall der Temperatur im Reinharzbereich statt. Auf Grund der hohen Temperatur des Formwerkzeuges wird das Harz nach 0,3 Minuten wieder auf die Solltemperatur erhitzt. Nach 16 Minuten bricht das Durchschallungssignal ab. Zu diesem Zeitpunkt wird die maximale Abweichung $\Delta\alpha_{max,190}$ erreicht. Sie beträgt 3,34%.

Die ermittelten Abweichungen aller Versuche sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

	Dim.	GFK-130	GFK-180	GFK-190	CFK-130	CFK-160	CFK-170
$\Delta\alpha_{max}$	[%]	0,81	0,51	3,34	3,82	3,14	3,16

Tabelle 5: Maximaler Unterschied des Aushärtegrades im faserverstärkten und Reinharzbereich

Auf Grund der maximalen Abweichung des Aushärtegrades von lediglich 3,82% wird die Annahme getroffen, dass zu jedem Zeitpunkt der Versuche der gleiche Aushärtegrad vorliegt.

Abbildung 34 verdeutlicht, dass im auswertbaren Zeitintervall Schwankungen der Temperatur auftreten. Die Annahme einer rein isothermen Aushärtung ist daher fehlerbehaftet. Zur Untersuchung der Einflüsse der Schwankungen wird daher die Differenz aus der Solltemperatur ϑ_{Soll} mit den über die Laufzeit der Versuche ermittelten Mittelwerten der Aushärtetemperatur $\vartheta_{Ist,MW}$ gebildet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 (GFK-Versuche) und Tabelle 7 (CFK-Versuche) aufgelistet.

	Dim.	GFK-120-2	GFK-130	GFK-140	GFK-150	GFK-160	GFK-170	GFK-180	GFK-190
ϑ_{Soll}	[°C]	120	130	140	150	160	170	180	190
$\vartheta_{Ist,MW}$	[°C]	120,04	129,57	140,73	151,00	158,74	170,88	179,05	190,51
$\Delta\vartheta$	[°C]	0,4	0,43	0,73	1,00	1,26	0,88	0,95	0,51

Tabelle 6: Vergleich der Solltemperaturen mit den gemessenen Temperaturen der isotherm ausgehärteten GFK-Versuche

	Dim.	CFK-130	CFK-140	CFK-160	GFK-170
ϑ_{Soll}	[°C]	130	140	160	170
$\vartheta_{Ist,MW}$	[°C]	130,19	139,62	161,40	173,30
$\Delta\vartheta$	[°C]	0,19	0,38	1,40	3,30

Tabelle 7: Vergleich der Solltemperaturen mit den gemessenen Temperaturen der isotherm ausgehärteten CFK-Versuche

Die GFK-Versuche zeigen im Durchschnitt eine Abweichung zur eingestellten Temperatur von maximal 1,26°C auf. Für die CFK-Versuche wird eine durchschnittliche Abweichung von maximal 3,30°C ermittelt. Die Temperaturschwankungen können durch die Exothermie der Reaktion oder Messungenauigkeiten entstehen. Die Differenzen sind jedoch so gering, dass die Annahme einer isothermen Aushärtung bei eingestellter Temperatur getroffen wird.

Bestimmung des Faservolumengehalts

Der Verschluss des Formwerkzeuges findet über handangezogene Schraubverbindungen am Rand des Deckels statt (siehe Anhang 9.6). Verformungen des Formwerkzeuges sind möglich und es wird geprüft, ob gleichmäßige Dicken in den einzelnen Stufen erreicht werden. Dafür wird eine Dickenmessung der Probekörper an den Positionierungen der Ultraschallsensorpaare durchgeführt. Die gemessenen Dicken werden zur Bestimmung der FVG und zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit verwendet. Die Messstellen (MS) sind in der Abbildung 35 dargestellt.

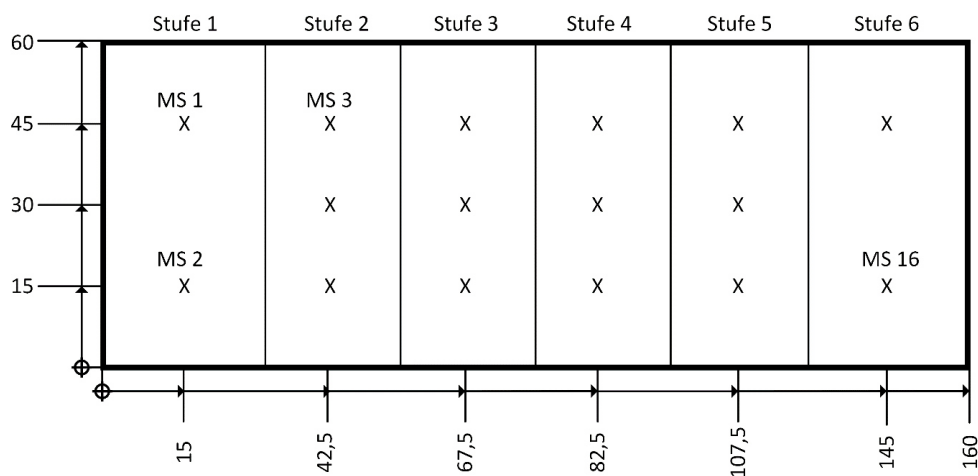


Abbildung 35: Schematische Darstellung (Draufsicht) der Probekörper und Markierungen der Messstellen (MS) zur Bestimmung der Laminatdicke

Die Dickenverteilung der Probekörper wird am Beispiel GFK-120-02 gezeigt¹. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 aufgeführt und zeigen eine maximale gemessene Dickendifferenz pro Stufe von 0,03mm. Auffällig ist, dass eine Differenz zwischen den gemes-

¹ Die weiteren Dickenmessungen befinden sich auf der beiliegenden CD-ROM.

senen Dicken $d_{gemessen}$ und den konstruierten Dicken $d_{konstruiert}$ existiert. Diese Differenz lässt sich durch die schlechte Kompressibilität des Glasfaserhalbzeuges erklären. Die Bestimmung des Faservolumengehalts findet nach Gleichung 4-1 statt. Die unterschiedlichen Dicken resultieren in einer Abweichung des Faservolumengehalts pro Stufe ($\Delta\varphi_{i,max}$) von maximal 0,2%. Diese Abweichung wird als vernachlässigbar eingestuft und die Annahme getroffen, dass für die einzelnen GFK-Versuche stufenweise der gleiche FVG gilt.

Stufe i	-	1	2	3	4	5	6
$d_{i,konstruiert}$	[mm]	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75
	[mm]	4,78	5,09	5,38	5,65	5,86	6,03
$d_{gemessen}$	[mm]	-	5,09	5,38	5,64	5,88	-
	[mm]	4,78	5,09	5,37	5,64	5,85	6,01
	[%]	58,8	55,2	52,2	49,7	47,9	0
φ	[%]	-	55,2	52,2	49,8	47,8	-
	[%]	58,8	55,2	52,3	49,8	48,0	0
$\Delta\varphi_{i,max}$	[%]	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0

Tabelle 8: Gemessene Dicken und erreichter FVG im Versuch GFK-120-02. Die Tabelleneinträge folgen der Verteilung der Messstellen in Abbildung 35

Versuchsübergreifend kann diese Annahme bei den GFK-Versuchen nicht getroffen werden. Der Vergleich der Messdaten zeigt, dass pro Stufe eine Abweichung des FVG von bis zu 2,7% erreicht wird. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle 9 aufgelistet:

Versuch	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
GFK-120-2	58,7%	55,2%	52,2%	49,8%	47,9%	-
GFK-120-3	59,8%	56,5%	53,6%	51,2%	49,0%	-
GFK-130	60,1%	56,8%	53,7%	51,2%	49,0%	-
GFK-140	59,3%	56,2%	53,0%	51,2%	49,3%	-
GFK-150	59,9%	56,7%	54,1%	51,8%	49,6%	-
GFK-160	60,3%	57,4%	54,8%	52,5%	50,4%	-
GFK-170	60,0%	56,8%	54,5%	52,3%	50,3%	-
GFK-180	58,3%	55,0%	52,7%	50,8%	49,0%	-
GFK-190	59,2%	56,0%	53,4%	51,3%	49,5%	-
$\Delta\varphi_{i,max}$	2,0%	2,4%	2,6%	2,7%	2,5%	-

Tabelle 9: Übersicht der gemittelten, stufenweise erreichten FVG aller GFK Versuche

Diese Abweichung kann aus einer inhomogenen Verteilung des Glasfasergeleges resultieren. Für den Vergleich von Messungen mit ähnlichem Faservolumengehalt werden daher nur Versuche miteinander verglichen, für die $\Delta\varphi_{max}$ möglichst gering ist.

Im Folgenden wird die Dickenverteilung für die CFK-Proben am Beispiel der CFK-130 Messung bestimmt. Aufgrund von Oberflächenfehlern in Form von Riefen, die durch die Nähte des Glasfasergeleges in die Bodenplatte gepresst wurden, werden die Taschen der Bodenplatte um weitere 0,5mm gesenkt.

Stufe i	-	1	2	3	4	5	6
$d_{i,konstruiert}$	[mm]	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25
	[mm]	5,01	5,25	5,49	5,74	5,97	6,20
$d_{gemessen}$	[mm]	-	5,25	5,49	5,75	5,98	-
	[mm]	5,04	5,27	5,52	5,75	5,97	6,20
	[%]	54,4	51,9	49,6	47,5	45,6	0
φ	[%]	-	51,9	49,6	47,4	45,6	-
	[%]	54,1	51,7	49,4	47,4	45,6	0
$\Delta\varphi_{i,max}$	[%]	0,3	0,2	0,2	0,1	0,0	0

Tabelle 10: Gemessene Dicken und erreichter FVG im Versuch CFK-130. Die Tabelleneinträge folgen der Verteilung der Messstellen in Abbildung 35

Für die ermittelten FVG des Versuches CFK-130 ist $\Delta\varphi_{i,max} \leq 0,3\%$. Es wird daher die Annahme getroffen, dass bei den CFK-Versuchen stufenweise der gleiche FVG erreicht wird. Versuchsübergreifend wird bei den CFK-Versuchen eine stufenweise Abweichung von maximal 1,6% ermittelt (siehe Tabelle 11).

Versuch	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
CFK-130	54,2%	51,8%	49,5%	47,4%	45,6%	-
CFK-140	54,4%	52,1%	50,0%	47,9%	45,9%	-
CFK-160	54,7%	52,2%	49,7%	-	-	-
CFK-170	55,8%	53,1%	50,6%	48,4%	46,4%	-
$\Delta\varphi_{i,max}$	1,6%	1,3%	1,1%	1,0%	0,8%	-

Tabelle 11: Übersicht der gemittelten, stufenweise erreichten FVG aller CFK Versuche

Die ermittelte Abweichung ist geringer als bei den GFK-Versuchen ($\Delta\varphi_{i,max,GFK} \leq 2,7\%$). Dennoch ist sie zu hoch, als dass die Annahme eines konstanten versuchsübergreifenden FVG pro Stufe getroffen werden kann. Es werden bei der weiteren Auswertung nur Stufen miteinander verglichen, für die $\Delta\varphi_{i,max}$ minimal ist.

Fazit

Im Bezug zur Forschungshypothese und der Charakterisierung der Einflussgrößen Temperatur, Faservolumengehalt und Aushärtegrad, kann in diesem Kapitel gezeigt werden, dass eine gezielte Untersuchung der Einflussgrößen mit dem entwickelten Versuchsstand möglich ist. Eine Schwachstelle des Formwerkzeuges zeigt sich in der Reproduzierbarkeit der erreichbaren Dicken der Proben. Der Einfluss des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit ist eine Teilaufgabe des folgenden Kapitels.

6 Entwicklung des Vorhersagemodells

Strategie

Zur Untersuchung der Einflüsse der Temperatur ϑ , des Aushärtegrades α und des Faservolumengehalts φ auf die Schallgeschwindigkeit c soll eine individuelle Untersuchung der Parameter stattfinden. Zur Minimierung der Wechselwirkung zwischen den Parametern werden zunächst eine und dann zwei Variablen gleichzeitig variiert. Tabelle 12 listet die zu überprüfenden Permutationen auf. Jegliche Permutationen werden mit den GFK- und CFK-Versuchen untersucht. Darüber hinaus werden die Einflüsse auf das Reinharzgebiet betrachtet.

Anzahl Veränderlicher	1	1	1	2	2	2
Variable Parameter	ϑ	α	φ	ϑ, α	ϑ, φ	α, φ
Konstante Parameter	α, φ	ϑ, φ	ϑ, α	φ	α	ϑ

Tabelle 12: Übersicht der zu untersuchenden Permutationen auf die Auswirkungen auf die Schallgeschwindigkeit

Alle Untersuchungen basieren auf den Messergebnissen der in Kapitel 5 durchgeführten Versuche, auf deren Basis anschließend ein Modell zur Berechnung der Laminatdicke entwickelt wird. Zur Approximation der Funktionswerte werden verschiedene Regressionsmodelle verwendet.

6.1 Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit

Reinharz

Für die Bestimmung der Temperatureinflüsse auf die Schallgeschwindigkeit ist die Festlegung konstanter Werte für den Aushärtegrad α und den Faservolumengehalt φ nötig. Der einfachste Fall ist die Untersuchung des Reinharzbereiches $\varphi = 0$ zum Zeitpunkt der Infusion $t_{Infusion}$. Zu diesem Zeitpunkt kann davon ausgegangen werden, dass $\alpha(t_{Infusion}) \approx 0$ gilt, da noch keine nennenswerte Vernetzung stattgefunden hat. Die Messergebnisse sind in Abbildung 36 dargestellt.

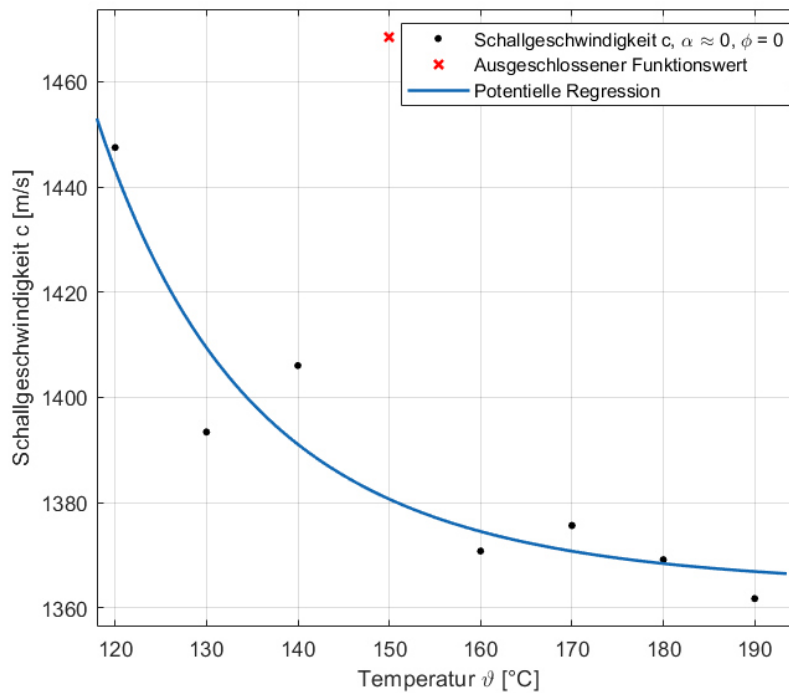


Abbildung 36: Darstellung der Temperaturabhängigkeit im Reinharzgebiet (Kanal 30) der Schallgeschwindigkeit mit $\phi = 0$ und $\alpha \approx 0$ inklusive potentieller Regression

Mit steigender Temperatur ist ein Abfall der Schallgeschwindigkeit erkennbar. Unter Ausschluss des Funktionswertes für GFK-150² lässt sich ein exponentieller Zusammenhang erkennen. Die potentielle Regression ergibt:

$$c(\vartheta)_{RH} = \left(1,686 \cdot 10^{16} \left(\frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} \right)^{-6,89} + 1364 \right) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad 6-1$$

mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,8429$. Für den in der Praxis üblichen Einsatzbereich von RTM 6 bei 100°C bis 240°C sind mit diesem Modell keine größeren Abweichungen zu erwarten. Außerhalb dieses Bereiches kann der Fehler auf Grund des exponentiellen Verlaufs zunehmen.

Glasfaserverstärkter Kunststoff

Zur Bestimmung der Temperatureinflüsse auf die Schallgeschwindigkeit im Faserverbund wird erneut der Zeitpunkt der Infusion mit $\alpha_{t_{\text{Infusion}}} \approx 0$ gewählt. Da bei den CFK-

² Der Versuch GFK-150 zeigte bereits im Kapitel 5.2 unerwartetes Verhalten auf. Für weitere Auswertungen werden die Ergebnisse dieses Versuchs schwächer gewichtet. Eine Wiederholung des Versuches ist geplant.

und GFK-Versuchen unterschiedliche Faservolumengehalte erreicht werden, ist keine Untersuchung bei gleichem FVG möglich. Zum Erhalt vergleichbarer Ergebnisse werden daher Messergebnisse mit einer Toleranz von $\varphi = 50 \pm 1\%$ zugelassen.

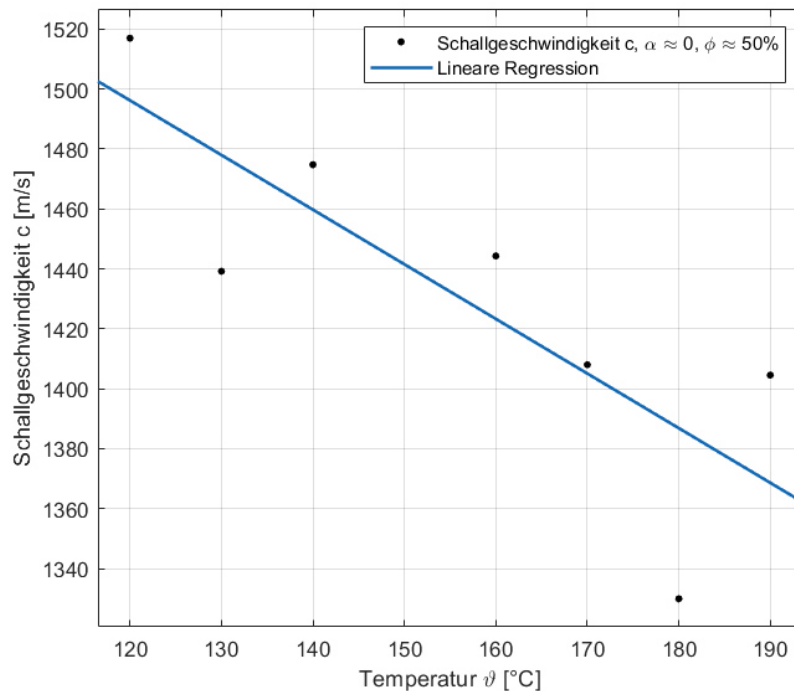


Abbildung 37: Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit bei GFK mit $\phi \approx 50\%$ und $\alpha \approx 0\%$

Die GFK-Versuche zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Aushärtetemperatur auf. Es werden Unterschiede von $1516 \frac{m}{s}$ bei $120^\circ C$ und bis zu $1330 \frac{m}{s}$ bei $180^\circ C$ gemessen. Der ermittelte lineare Zusammenhang lässt sich wie folgt beschreiben:

$$c(\vartheta)_{GFK} = \left(-1,822 \frac{\vartheta}{^\circ C} + 1715 \right) \frac{m}{s} \quad 6-2$$

und besitzt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,6599$. Der Verlauf des Graphen und die quantitative Auswertung zeigen, dass die Temperatur erheblichen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit hat und für die Bestimmung exakter Laminatdicken beachtet werden sollte.

Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Für die CFK-Versuche werden vier Versuche bei unterschiedlichen Temperaturen miteinander verglichen. Die ermittelten Schallgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt der Infusion bei einem Faservolumengehalt von ungefähr 50% sind in der folgenden Abbildung 38 dargestellt.

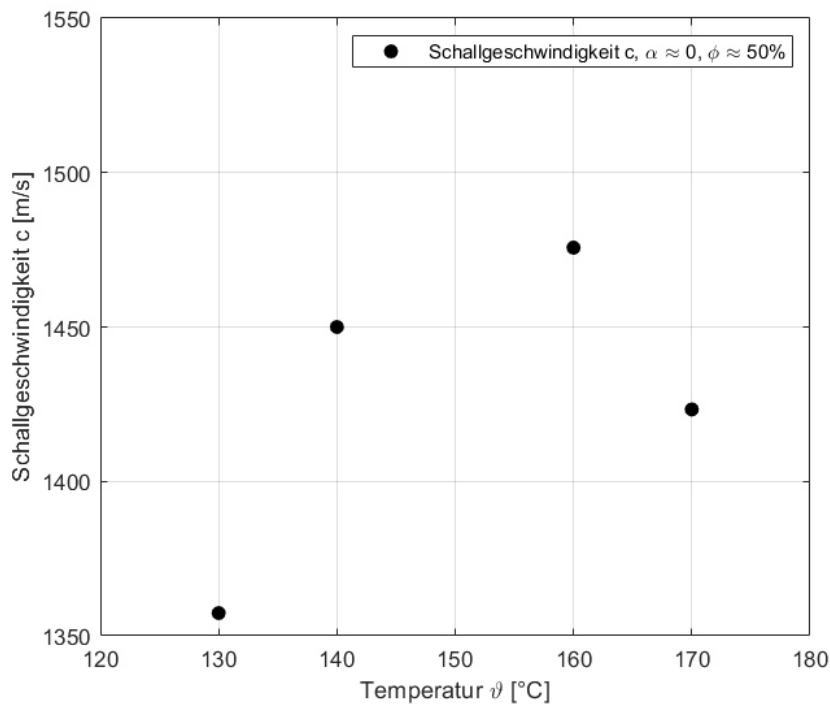


Abbildung 38: Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit bei CFK mit $\phi \approx 50\%$ und $\alpha \approx 0\%$

Die Untersuchung der CFK-Messergebnisse bezüglich der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit zur Temperatur lässt keine qualitative Aussage zu. Grund dafür ist die geringe Anzahl an Versuchen und das sprunghafte Verhalten zwischen den einzelnen Messstellen. Quantitativ sind Schallgeschwindigkeiten zwischen $1357 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bei 130°C und $1457 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bei 180°C gemessen worden, die eine Temperaturabhängigkeit andeuten. Es wird jedoch auf die Bildung eines Regressionsmodells auf Grund der Anzahl an Messpunkten verzichtet.

6.2 Einfluss des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit

Glasfaserverstärkter Kunststoff

Zur Untersuchung des Einflusses des Faservolumengehalts ϕ auf die Schallgeschwindigkeit c werden exemplarisch alle Kanäle des Versuches GFK-130 zum Zeitpunkt der Infusion mit $\alpha_{t_{Infusion}} \approx 0$ ausgewertet. In diesem Versuch werden Faservolumenanteile von $48,8\% \leq \phi \leq 60,1\%$ erreicht. Die Messergebnisse sind in Abbildung 39 aufgeführt.

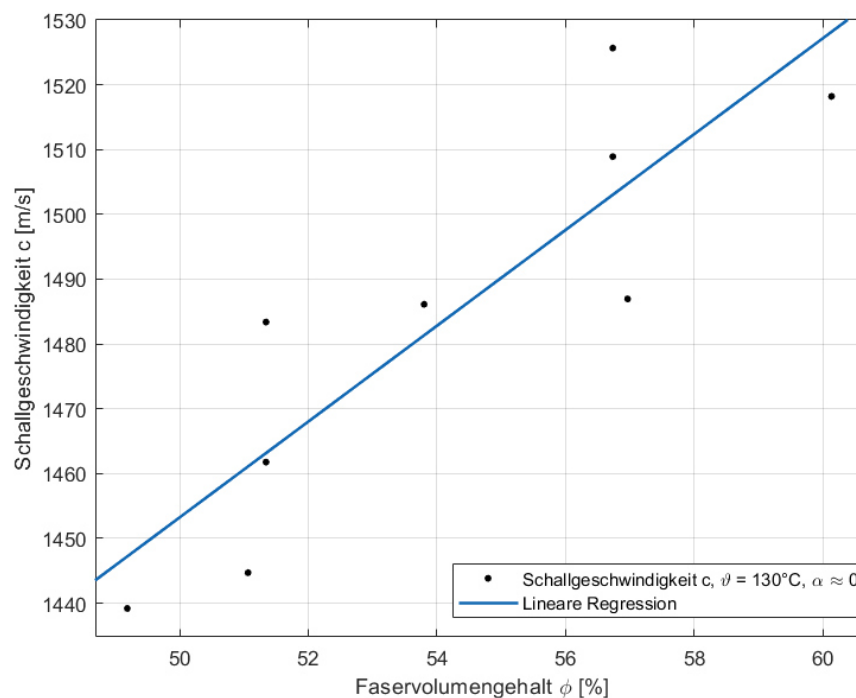


Abbildung 39: Darstellung des Einflusses des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit im Versuch GFK-130 inklusive linearer Regression

Zwischen Faservolumengehalt und der gemessenen Schallgeschwindigkeit besteht ein linearer Zusammenhang. Dieser lässt sich mit folgender linearer Regression beschreiben:

$$c(\phi)_{GFK} = (7,39\phi + 1084) \frac{m}{s} \quad 6-3$$

Die Lineare Regression besitzt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,7721$. Bei der Verteilung der Messpunkte ist auffällig, dass bei vergleichbarem Faservolumengehalt unterschiedliche Geschwindigkeiten aufgezeichnet werden (zum Beispiel bei $\phi \approx 51\%$).

Dies kann aus Messungenauigkeiten oder ungleicher Anbringung der Ultraschallsensoren erfolgen, die ein Resultat unterschiedlich dicker Fügstellen sein können. Die Auswertung der Messdaten zeigt darüber hinaus die geringen quantitativen Auswirkungen des Faservolumengehalts auf die gemessene Schallgeschwindigkeit. Laut Regressionsmodell führt eine Differenz von 2% zu einer Abweichung der Schallgeschwindigkeit von lediglich $14,78 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Die Bestimmung der Abhängigkeit des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit bei den CFK-Versuchen findet analog zur zuvor vorgestellten Methode für die GFK-Versuche statt. Es wird der CFK-130 Versuch betrachtet, der eine Untersuchung des Faservolumengehalts von $45,8\% \leq \phi \leq 52,0\%$ erlaubt.

Die Auswertung von CFK-130 deutet ansatzweise auf einen linearen Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit und dem Faservolumengehalt hin (siehe Abbildung 40).

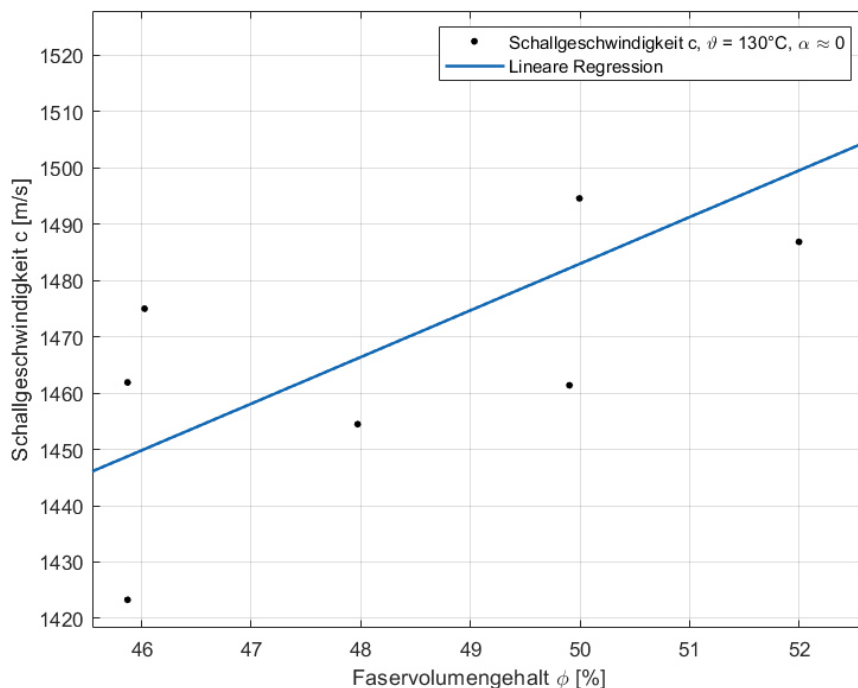


Abbildung 40: Darstellung des Einflusses des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit im Versuch CFK-130 inklusive linearer Regression

Mittels linearer Regression ergibt sich folgende Gleichung:

$$c(\phi)_{CFK} = (8,286\phi + 1069) \frac{m}{s} \quad 6-4$$

Die angegebene Regressionsvorschrift beschreibt die Messpunkte mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,5588$. Auf Grund des geringen Wertes für R^2 kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein nicht linearer Zusammenhang zwischen den Messergebnissen besteht. Es sollten daher noch weitere Messungen durchgeführt werden, damit ein breiteres Intervall für ϕ untersucht werden kann und die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vom Kohlenstofffaservolumengehalt zuverlässig beschreibbar ist.

6.3 Einfluss des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit

Für die Bestimmung der Einflussnahme des Aushärtegrades α auf die Schallgeschwindigkeit c werden die Versuche GFK-130 und CFK-130 betrachtet. Der Aushärtegrad wird über ein am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik entwickeltes Modell berechnet. Dafür werden die in Kapitel 5.2 vorgestellten isothermen Temperaturverläufe genutzt. Der Aushärtegrad wird für die Versuche bis zum Zeitpunkt des Signalabbruchs ausgewertet.

Reinharz

Die Untersuchung des Reinharzgebietes erfolgt über die gemessenen Schallgeschwindigkeiten des Kanals 30 im Versuch GFK-130, der zuvor schon in Kapitel 5.2 vorgestellt wurde. Die Darstellung der Messergebnisse (siehe Abbildung 41) zeigt, dass die Schallgeschwindigkeit für niedrige Aushärtegrade langsamer ansteigt, als für höhere Aushärtegrade mit $14\% \leq \alpha \leq 30\%$. Für Aushärtegrade über 30% deutet sich ein Abfall der Steigung der Schallgeschwindigkeit an. Dieser kann jedoch auf Grund des Signalabbruches nicht weiter dargestellt werden. Für die Beschreibung des Einflusses des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit im untersuchbaren Intervall wird daher ein exponentieller Zusammenhang als Grundlage für die Regression gewählt.

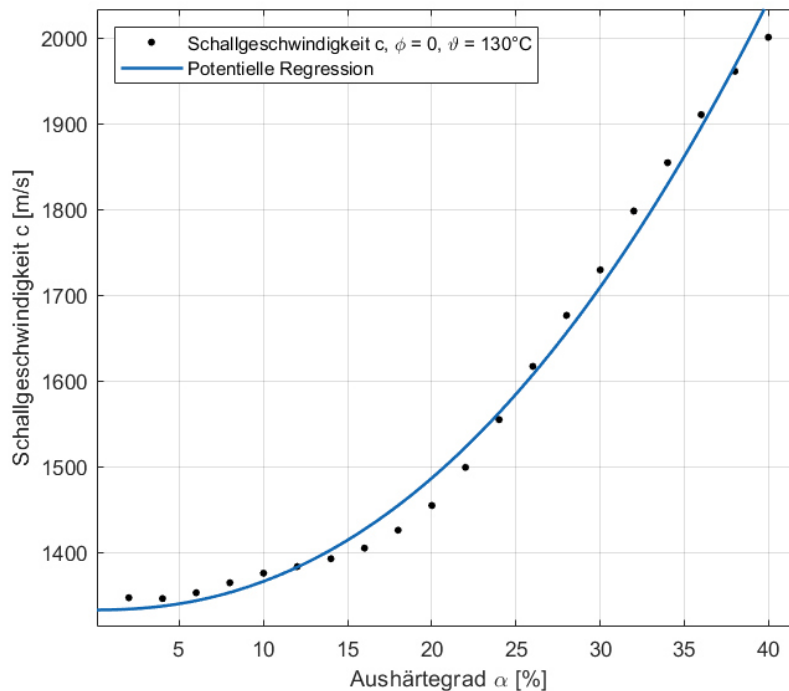


Abbildung 41: Darstellung der Abhängigkeit des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit im Reinharzbereich (Kanal 30) im Versuch GFK-130

Die potentielle Regression beschreibt den Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9917$ und lautet wie folgt:

$$c(\alpha)_{RH} = (0,2059\alpha^{2,208} + 1333) \frac{m}{s} \quad 6-5$$

Trotz des hohen Wertes für R^2 , der eine quantitativ genaue Approximation im betrachteten Intervall für α zulässt, deutet die qualitative Betrachtung auf einen Zusammenhang hin, der eher einer Sigmoiden Funktion ähnelt. Auf Grund des Signalabbruchs lässt sich dieser Zusammenhang jedoch nicht für die durchgeführten Messungen verwenden und es wird von einer exponentiellen Beziehung zwischen dem Aushärtegrad und der Schallgeschwindigkeit im Reinharzbereich ausgegangen.

Glasfaserverstärkter Kunststoff

Die Auswertung der GFK-Versuche findet über den Kanal 20 im Versuch GFK-130 statt. Es wird ein Faservolumengehalt von $\phi = 51,2\%$ bei einer konstanten Temperatur von $\vartheta = 130^\circ\text{C}$ betrachtet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 42 dargestellt.

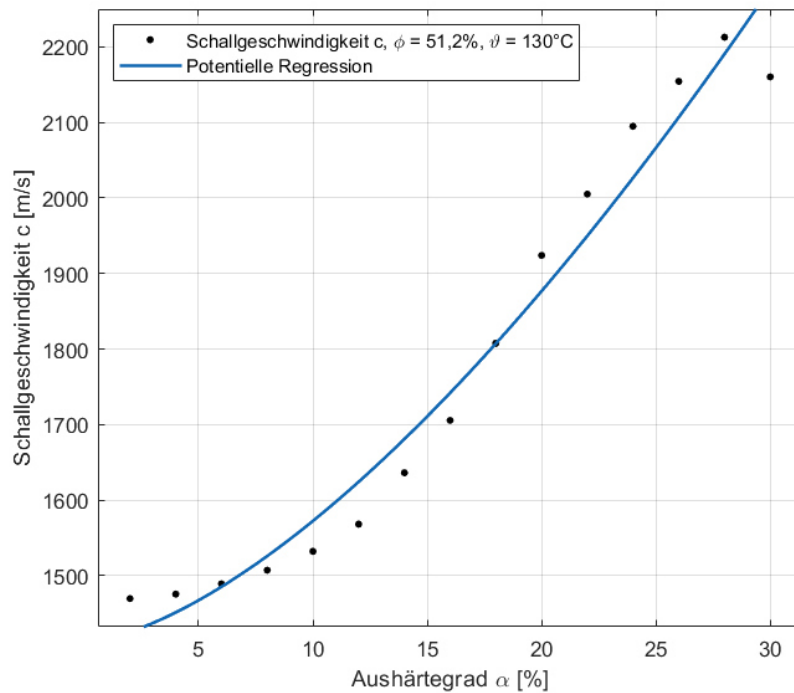


Abbildung 42: Darstellung der Abhängigkeit des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit im glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK-130) bei einem Faservolumengehalt von 51,2%

Die GFK-Versuche zeigen ebenfalls einen starken Anstieg der Schallgeschwindigkeit für $\alpha \leq 18\%$ und anschließend eine geringere Steigung der Schallgeschwindigkeiten bei höheren Aushärtegraden auf. Dies ist plausibel, da der Aushärtegrad nur Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit des Harzes hat und deshalb ein ähnlicher qualitativer Verlauf zu erwarten ist. Aus den zuvor genannten Gründen wird erneut eine potentielle Regression für das betrachtete Intervall gebildet. Sie ergibt, trotz des qualitativ ange deuteten sigmoiden Verlauf, mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,9667$:

$$c(\alpha)_{GFK} = (4,695\alpha^{1,534} + 1412) \frac{m}{s} \quad 6-6$$

Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Im Versuch CFK-130 wird die Schallgeschwindigkeit des Kanals 12 und ein Faservolumengehalt von $\phi = 49,5\%$ betrachtet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 43 dargestellt.

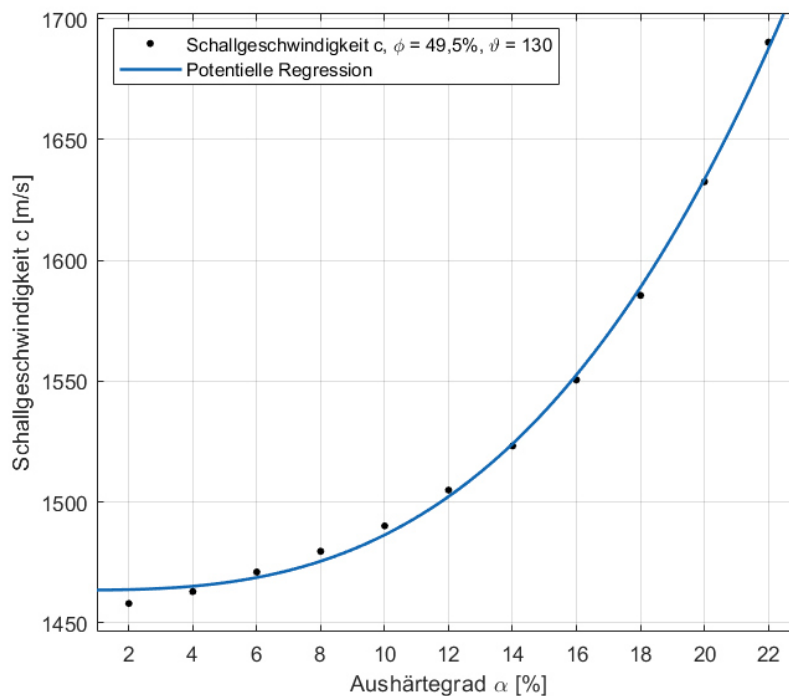


Abbildung 43: Darstellung der Abhängigkeit des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit im kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff (CFK-130) bei einem Faservolumengehalt von 49,5%

Im Vergleich zu den vorher betrachteten Untersuchungen, zum Reinharzbereich und zu GFK-130, ist ein rein exponentieller Anstieg der Funktion zu erkennen. Dies lässt sich auf den vergleichsweise geringen Aushärtegrad von 22% zurückführen, der zum Zeitpunkt des Signalabbruches berechnet wird. Die potentielle Regression ergibt:

$$c(\alpha)_{CFK} = (0,02907\alpha^{2,895} + 1464) \frac{m}{s} \quad 6-7$$

und besitzt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,9982$.

Dass das Signal bereits bei einem berechneten Aushärtegrad von 22% abbricht, kann auf eine Ungenauigkeit des verwendeten Modells zur Berechnung des Aushärtegrades zurückzuführen sein. In Kapitel 5.2 konnte gezeigt werden, dass die Signallabbruchzeiten nahe der Vitrifikationslinie liegen. Zum Zeitpunkt der Vitrifikation müsste demnach das Harz versuchsübergreifend den gleichen Aushärtegrad besitzen (siehe Kapitel 2.1). Zur Verifizierung des berechneten Aushärtegrades sollten daher zusätzlich DSC-Messungen durchgeführt werden. Dennoch wird im Rahmen dieser Arbeit mit den durch das Modell ermittelten Aushärtegraden weitergearbeitet und auf deren Basis ein Modell zur Bestimmung der Laminatdicke entwickelt.

6.4 Einfluss des Aushärtegrades und der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit

Zur Bestimmung der Auswirkungen des Aushärtegrades α und der Temperatur ϑ auf die Schallgeschwindigkeit werden die GFK- und CFK-Versuche bei einem festgelegten Faservolumengehalt untersucht. Da der Aushärtegrad von der Temperatur abhängig ist, können die zuvor bestimmten Gleichungen aus Kapitel 6.1 und 6.3 nicht überlagert werden. Stattdessen werden Funktionswerte für $c(\alpha, \vartheta)$ aus den Versuchsreihen gebildet. Damit eine hohe Genauigkeit erreicht wird, werden die Funktionswerte jeweils nach einer Steigerung des Aushärtegrades von 2% bestimmt. Ausgehend von diesen Funktionswerten werden anschließend Modelle zur Beschreibung der Schallgeschwindigkeit per Regression gebildet.

Reinharz

Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit im Reinharzgebiet findet über die Messergebnisse des Kanals 30 über alle GFK-Versuche statt. Aus der festgelegten Schrittweite von 2% für den Aushärtegrad wird aus 181 ausgewerteten Messpunkten folgender Graph (siehe Abbildung 44) modelliert:

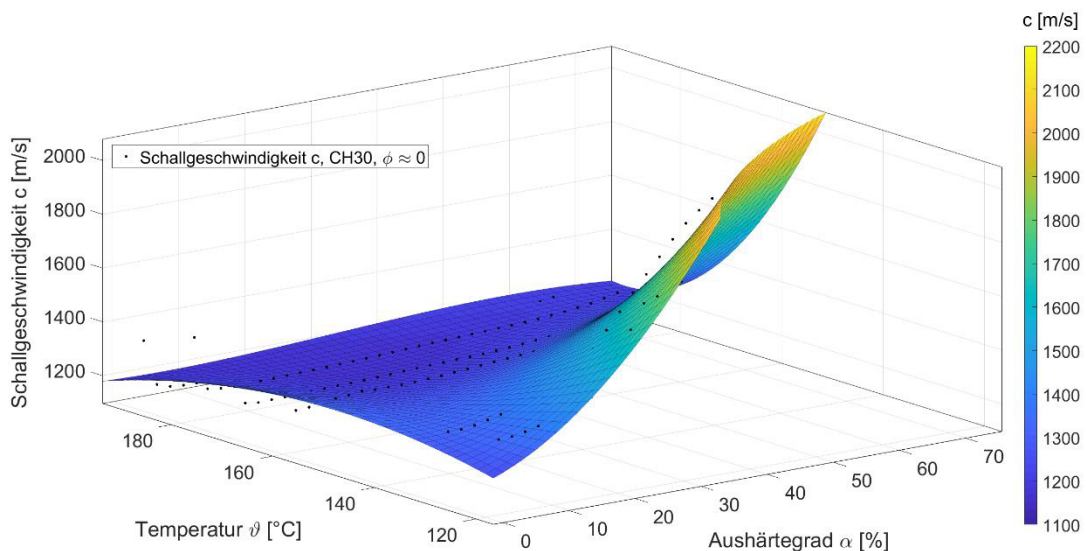


Abbildung 44: Dreidimensionale Darstellung der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur und dem Aushärtegrad im Reinharzgebiet (Kanal 30)

Zur Verbindung der Messpunkte wird eine polynomiale Regression gewählt. Da in Kapitel 6.1 ein potenzieller Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit und der

Temperatur bestimmt wurde, wird dieser Bereich mit einem Polynom zweiter Ordnung approximiert. In Kapitel 6.3 ist ebenfalls ein potenzieller Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit und dem Aushärtegrad gezeigt worden. Allerdings wurde auf die Änderung der Steigung hingewiesen, die ab einem bestimmten Aushärtegrad auftritt. Um diesen Wendepunkt mathematisch beschreiben zu können, reicht ein Polynom zweiten Grades nicht aus. Stattdessen wird dieser Zusammenhang über eine kubische Funktion (Polynom dritten Grades) approximiert. Die Regression der Fläche in Abbildung 44 besitzt somit folgende Form:

$$c_{RH}(\alpha, \vartheta) = \left(r_{00} + r_{10}\alpha + r_{01}\frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} + r_{20}\alpha^2 + r_{11}\alpha\frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} + r_{02}\frac{\vartheta^2}{^{\circ}\text{C}^2} + p_{30}\alpha^3 \right. \\ \left. + r_{21}\alpha^2\frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} + r_{12}\alpha\left(\frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}}\right)^2 \right) \frac{m}{s} \quad 6-8$$

Die Regressionsparameter sind der folgenden Tabelle 13 zu entnehmen:

Regressionsparameter	r_{00}	r_{10}	r_{01}	r_{20}	r_{11}	r_{02}	r_{30}	r_{21}	r_{12}
Wert	1244	55,12	-161,5	53,41	-127	90,84	-4,569	-36,65	76,8

Tabelle 13: Regressionsparameter für $c_{RH}(\alpha, \vartheta)$

Das Bestimmtheitsmaß für die dargestellte Regression beträgt $R^2=0,9417$. Das hohe Bestimmtheitsmaß deutet auf eine gute Beschreibbarkeit der Schallgeschwindigkeit im Reinharzbereich in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Aushärtegrad hin. Zur leichteren Analyse der Messergebnisse ist in Abbildung 45 die Draufsicht auf den Funktionsgraphen dargestellt. Es ist erkennbar, dass zum Erhalt der gleichen Schallgeschwindigkeit bei höheren Fertigungstemperaturen ein höherer Aushärtegrad nötig ist. Sofern während der Fertigung Informationen über die Temperatur bekannt sind, lässt sich durch die dargestellte Abbildung anhand der gemessenen Schallgeschwindigkeit der Aushärtegrad des Harzes bestimmen.

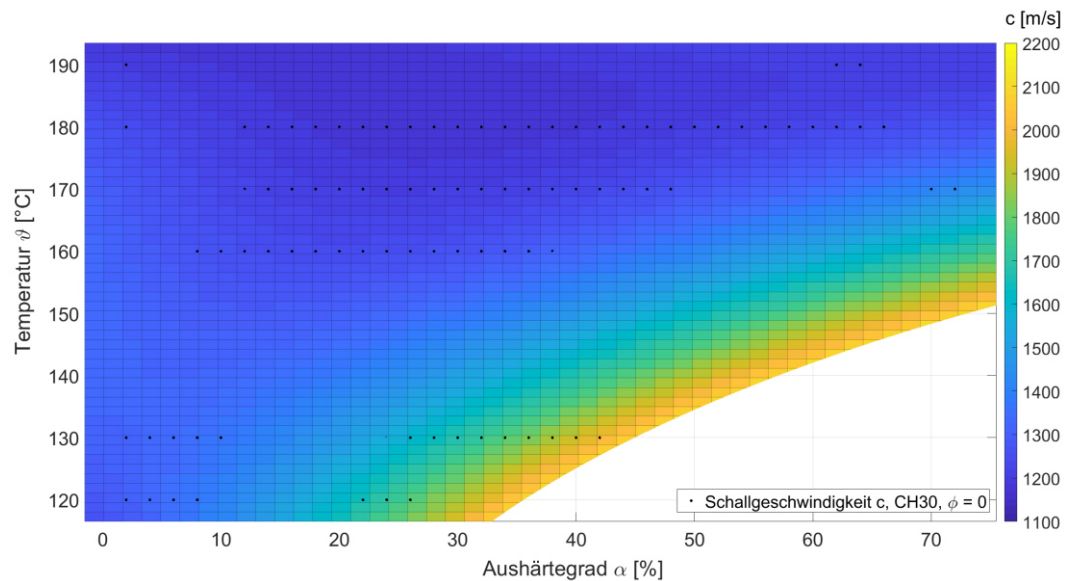


Abbildung 45: Draufsicht zur Darstellung der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit zur Temperatur und zum Aushärtegrad im Reinharzbereich

Glasfaserverstärkter Kunststoff

Durch die Auswertung des Kanals 10 der GFK-Versuche kann unter zuvor beschriebener Auflösung für α von 2% eine Fläche aus 170 Messpunkten modelliert werden. Betrachtet wird ein Faservolumengehalt von ungefähr 56%. Die Ergebnisse sind in Abbildung 46 dargestellt.

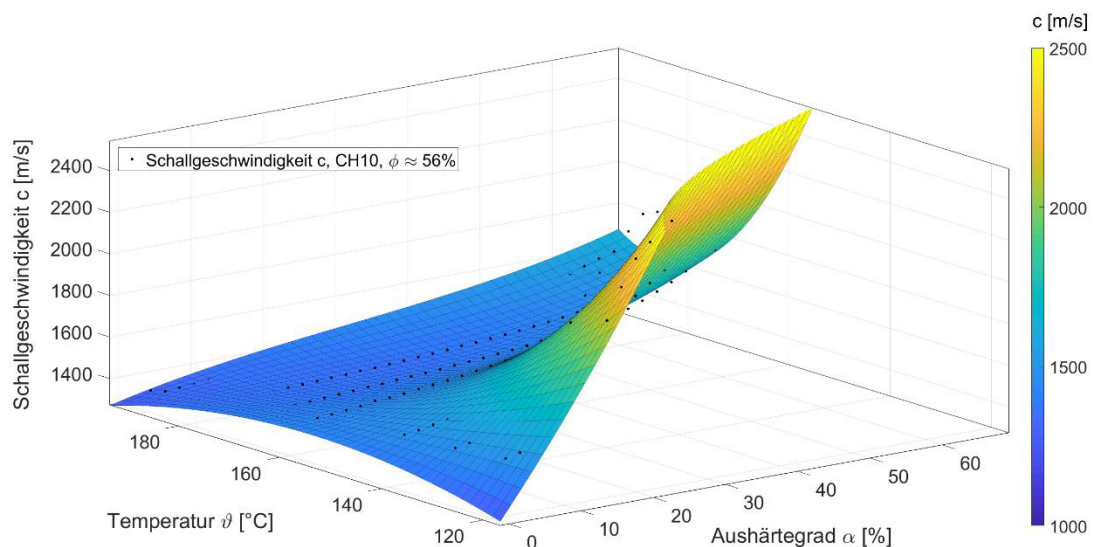


Abbildung 46: Dreidimensionale Darstellung der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur und dem Aushärtegrad im glasfaserverstärkten Kunststoff bei einem Faservolumengehalt von ungefähr 56% (Kanal 10)

Obwohl in Kapitel 6.1 ein linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Schallgeschwindigkeit im glasfaserverstärkten Kunststoff ermittelt wurde, führt eine lineare Beschreibung für ϑ zu einem Regressionsmodell mit einem geringen Bestimmtheitsmaß. Deshalb wird für ϑ ein Polynom zweiter Ordnung verwendet. Das Regressionsmodell für $c_{GFK}(\alpha, \vartheta)$ besitzt somit ebenfalls die zuvor dargestellte Form, die zur Beschreibung im Reinharzbereich genutzt wird (siehe Gleichung 6-8). Die Regressionsparameter sind der Tabelle 14 zu entnehmen.

Regressionsparameter	r_{00}	r_{10}	r_{01}	r_{20}	r_{11}	r_{02}	r_{30}	r_{21}	r_{12}
Wert	1469	95,7	-284,1	53,73	-216,9	194,1	8,392	-43,64	147,6

Tabelle 14: Regressionsparameter für $c_{GFK}(\alpha, \vartheta)$

Die erstellte Fläche besitzt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,9758$. Die Analyse der Draufsicht des Regressionsmodells (Abbildung 47) zeigt einen qualitativ ähnlichen Verlauf, wie zuvor der Reinharzbereich (Abbildung 45). Quantitativ sind die gemessenen Schallgeschwindigkeiten höher. Dies entspricht den in Kapitel 6.1 und Kapitel 6.3 gemachten Beobachtungen und lässt sich auf den höheren E-Modul des Verbundes senkrecht zur Faserrichtung zurückführen.

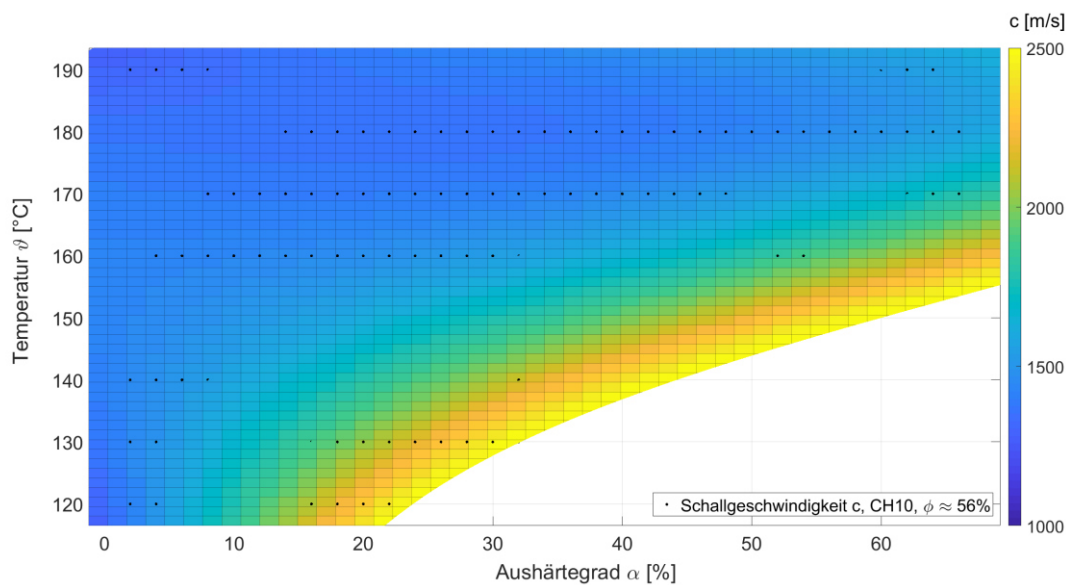


Abbildung 47: Draufsicht zur Darstellung der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit zur Temperatur und zum Aushärtegrad im glasfaserverstärkten Bereich

Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Die Auswertung des Kanals 12 über die CFK-Versuche ermöglicht die Entwicklung eines Regressionsmodells aus 84 Messdaten. Die geringere Anzahl an Messdaten resultiert aus der geringeren Anzahl an durchgeführten Versuchen bei unterschiedlicher Temperierung. Das Ergebnis ist in Abbildung 48 dargestellt.

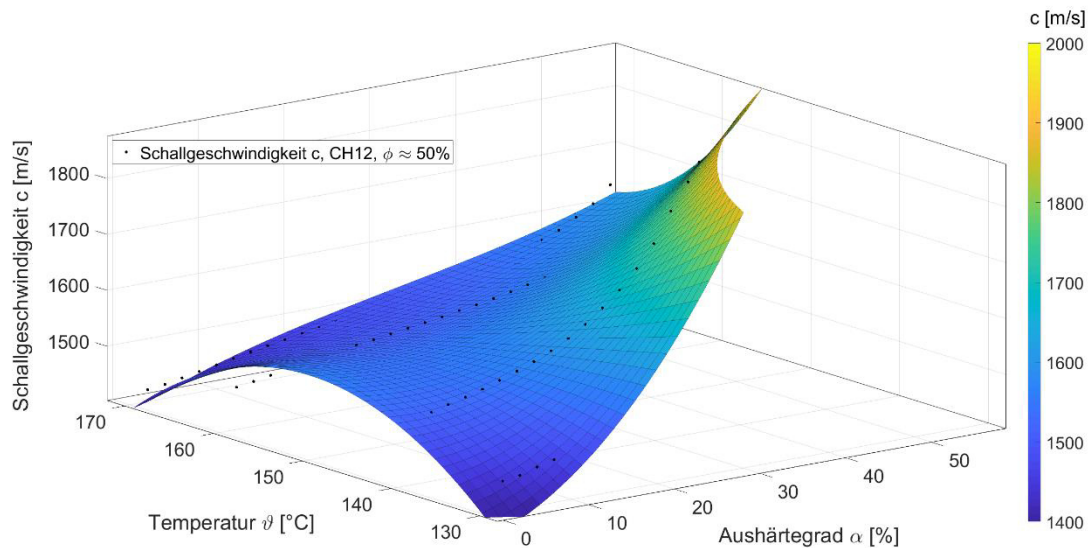


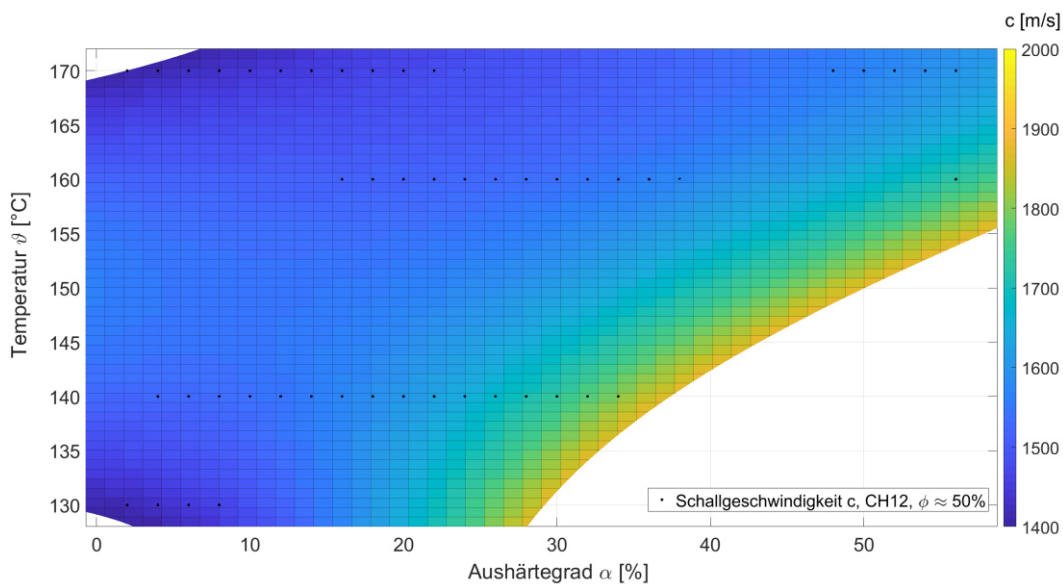
Abbildung 48: Dreidimensionale Darstellung der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur und dem Aushärtegrad im kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff bei einem Faservolumengehalt von ungefähr 50% (Kanal 12)

In Kapitel 6.1 ist auf Grund der geringen Anzahl der durchgeführten Versuche und einer nicht eindeutigen Beschreibbarkeit der Einflüsse der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit in den CFK-Versuchen auf eine Regression verzichtet worden. Da keine Kenntnisse über die am besten geeignete Regression vorliegen, wird angenommen, dass sich die CFK-Versuche ähnlich wie die GFK-Versuche verhalten. Für das Regressionsmodell im dreidimensionalen wird daher die zuvor verwendete polynomi-ale Regression gewählt, die den Einfluss des Aushärtegrades als Polynom dritter Ordnung und den Einfluss der Temperatur als Polynom zweiter Ordnung modelliert (siehe Gleichung 6-8). Die gemessenen Daten lassen sich somit mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,9682$ beschreiben. Die Regressionsparameter sind der Tabelle 15 zu entnehmen.

Regressionsparameter	r_{00}	r_{10}	r_{01}	r_{20}	r_{11}	r_{02}	r_{30}	r_{21}	r_{12}
Wert	1549	48,92	-82,79	36,48	-70,53	20,97	4,745	-39,27	65,55

Tabelle 15: Regressionsparameter für $c_{CFK}(\alpha, \vartheta)$

Auf Grund der Wahl des Regressionsmodells ist für den Fall des Aushärtegrades von $\alpha = 0\%$ ein quadratischer Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Schallgeschwindigkeit erkennbar. Dies kann aus der geringen Anzahl an untersuchten Temperaturen resultieren und sollte durch weitere Versuche überprüft werden. Die Draufsicht auf den Funktionsgraphen (Abbildung 49) zeigt jedoch für höhere Aushärtegrade den qualitativ gleichen Verlauf der Schallgeschwindigkeit auf, wie auch bei der Analyse des Reinharzbereiches und der GFK-Versuche. Für höhere Aushärtegrade wird daher angenommen, dass das entwickelte Regressionsmodell für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe zur Dickenmessung verwendbare Resultate liefert.

**Abbildung 49: Draufsicht zur Darstellung der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur und des Aushärtegrades im kohlenstofffaserverstärkten Bereich**

6.5 Einfluss der Temperatur und des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit

Die Bestimmung der Auswirkungen der Temperatur ϑ und des Faservolumengehalts ϕ auf die Schallgeschwindigkeit c wird zum Zeitpunkt der Infusion $t_{Infusion} = 0$ mit einem Aushärtegrad $\alpha(t_{Infusion}) \approx 0$ durchgeführt.

Glasfaserverstärkter Kunststoff

In den vorherigen Kapiteln 6.1 und 6.2 ist bei den GFK-Versuchen jeweils ein linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur sowie des Faservolumengehalts zur Schallgeschwindigkeit gezeigt worden. Es wird daher versucht, die Messergebnisse für $c_{GFK}(\vartheta, \phi)$ mit zwei Polynomen ersten Grades zu beschreiben. Für mehrfach auftretende Funktionswerte wird jeweils der Mittelwert betrachtet. Insgesamt werden 61 Messpunkte betrachtet. Das Ergebnis ist in Abbildung 50 dargestellt.

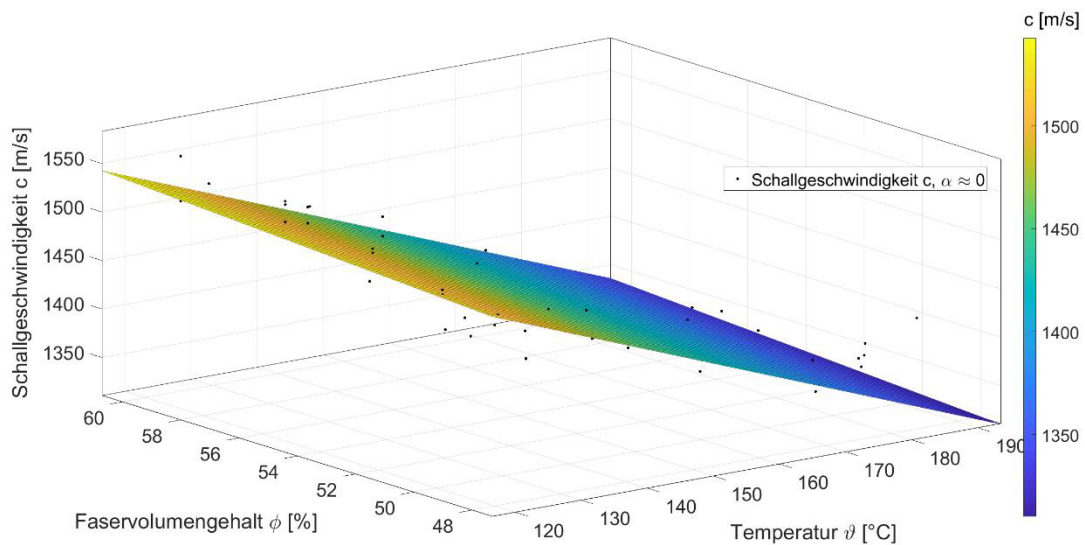


Abbildung 50: Dreidimensionale Abbildung zur Darstellung der Einflüsse der Temperatur und des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit der GFK-Versuche zum Zeitpunkt der Infusion mit einem Aushärtegrad von ungefähr 0%

Das Regressionsmodell wird durch folgende Gleichung mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,8856$ beschrieben:

$$c_{GFK}(\vartheta, \phi) = \left(1739 - 2,685 \frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} + 1,913\phi \right) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad 6-9$$

Die Beschreibung der linearen Zusammenhänge zwischen Temperatur und Faservolumengehalt zur Schallgeschwindigkeit werden somit auch versuchsübergreifend bekräftigt. Eine qualitative Analyse der Draufsicht der entwickelten Fläche (Abbildung 51) zeigt, dass die höchsten messbaren Schallgeschwindigkeiten bei hohem Faservolumengehalt und geringer Aushärtetemperatur auftreten. Dies entspricht den Erwartungen aus den vorherigen Kapiteln.

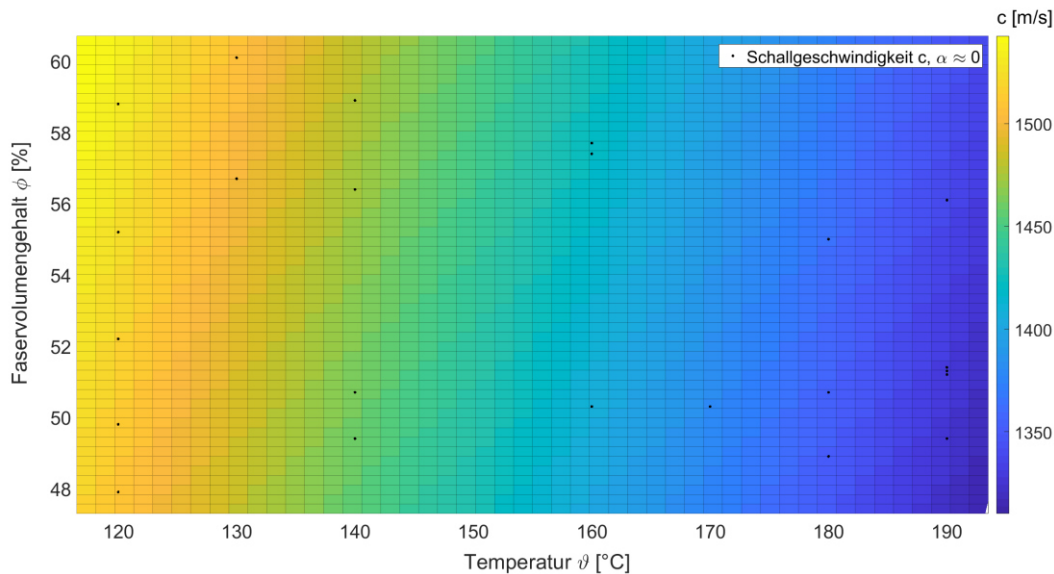


Abbildung 51: Draufsicht der Darstellung der Einflüsse des Faservolumengehalts und der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit

Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Für den Zusammenhang zwischen Temperatur, Faservolumengehalt und Schallgeschwindigkeit konnten 31 Messdaten ausgewertet werden. In Kapitel 6.1 ist kein eindeutiger Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit bestimmt worden. Darüber hinaus konnte in Kapitel 6.2 der lineare Zusammenhang zwischen dem Faservolumengehalt und der Schallgeschwindigkeit nur mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,5588$ beschrieben werden. Aus diesen Gründen können anhand der Versuchsdaten keine Annahmen für ein geeignetes Regressionsmodell getroffen werden und es wird auf die Bildung eines dreidimensionalen Regressionsmodells für die CFK-Versuche verzichtet.

6.6 Einfluss des Aushärtegrades und des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit

Die Bestimmung der Einflüsse von Aushärtegrad und Faservolumengehalt auf die Schallgeschwindigkeit wird am Beispiel der GFK- und CFK-170 Versuche demonstriert. Die Funktionswerte setzen sich aus dem gemessenen Faservolumengehalt ϕ und einer Schrittweite von 2% des Faservolumengehaltes α zusammen.

Glasfaserverstärkter Kunststoff

Basierend auf dem zuvor erkannten linearen Zusammenhang zwischen Faservolumengehalt ϕ und Schallgeschwindigkeit c , wird ϕ durch ein Polynom ersten Grades beschrieben. Für den Aushärtegrad α wird, wie in Kapitel 6.4, ein Polynom dritter Ordnung verwendet. Aus der festgelegten Auflösung für α und der Auswertung aller ermittelten Faservolumengehalte ($50,2\% \leq \phi \leq 60,1\%$) des Versuchs GFK-170 wird aus 350 Messdaten nachkommende Fläche modelliert:

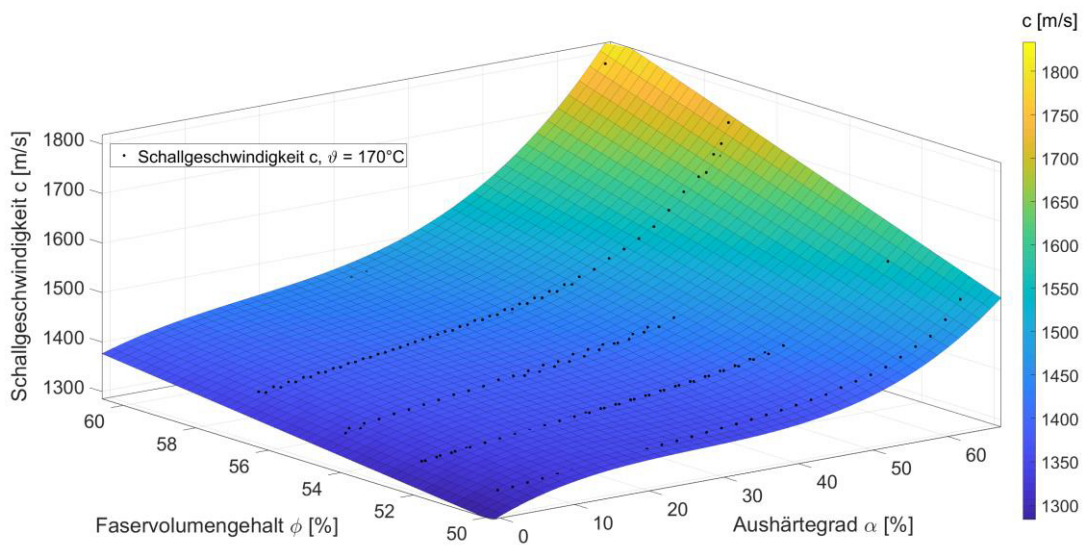


Abbildung 52: Dreidimensionale Darstellung der Einflüsse des Faservolumengehalts und des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit im glasfaserverstärkten Kunststoff bei einer isothermen Aushärtung von 170°

Die modellierte Fläche lässt sich durch folgendes Regressionsmodell beschreiben:

$$c_{GFK}(\alpha, \phi) = (r_{00} + r_{10}\alpha + r_{01}\phi + r_{20}\alpha^2 + r_{11}\alpha\phi + r_{30}\alpha^3 + r_{21}\alpha^2\phi) \frac{m}{s} \quad 6-10$$

Mit der Verwendung der in Tabelle 16 aufgelisteten Regressionsparameter wird ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9673$ erreicht, wodurch die Annahme des linearen Zusammenhangs zwischen dem Faservolumengehalt sowie der kubische Zusammenhang zwischen dem Aushärtegrad und der Schallgeschwindigkeit bestärkt wird.

Regressionsparameter	r_{00}	r_{10}	r_{01}	r_{20}	r_{11}	r_{30}	r_{21}
Wert	1404	30,61	29,54	19,87	12,36	14,84	5,556

Tabelle 16: Regressionsparameter für $c_{GFK}(\alpha, \phi)$

Insgesamt entspricht Abbildung 52 den Erwartungen der vorangegangenen Kapitel 6.2 und 6.3 und zeigt, dass mit steigendem Faservolumengehalt und steigendem Aushärtegrad höhere Schallgeschwindigkeiten ermittelt werden.

Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Für die Bildung des Regressionsmodells für den kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff wird exemplarisch der Versuch CFK-170 betrachtet. Die Auswertung des Faservolumengehalts ($46,4\% \leq \phi \leq 55,8\%$) bei der festgelegten Schrittweite von $\alpha = 2\%$ ergibt 248 Messstellen. Für das Regressionsmodell wird für den Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Aushärtegrad ein Polynom dritten Grades verwendet. Der Zusammenhang zwischen dem Faservolumengehalt und der Schallgeschwindigkeit innerhalb der CFK-Versuche konnte nicht eindeutig bestimmt werden, weshalb die Annahme eines linearen und quadratischen Zusammenhangs auf Eignung zur Darstellung der Messergebnisse überprüft wird. Da das Regressionsmodell bei Verwendung einer linearen Annahme zwischen dem Faservolumengehalt und der Schallgeschwindigkeit nur ein geringes Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 66,14$ ergibt, wird der Faservolumengehalt durch ein Polynom zweiten Grades beschrieben. Die hierdurch modellierte Fläche ist in Abbildung 53 dargestellt.

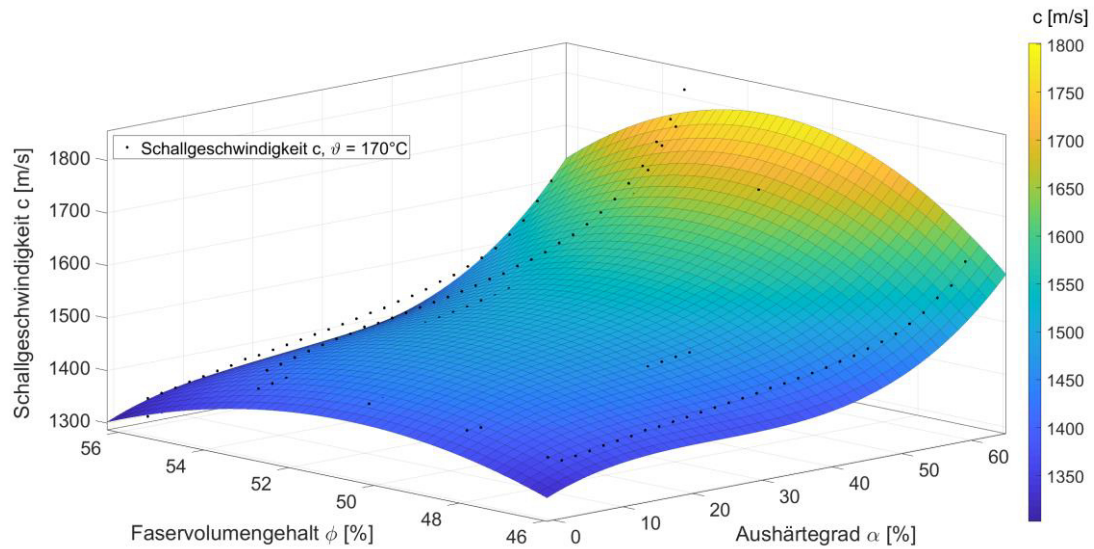


Abbildung 53: Dreidimensionale Darstellung der Einflüsse des Faservolumengehalts und des Aushärtegrades auf die Schallgeschwindigkeit im kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff bei einer isothermen Aushärtung von 170°

Die vorangegangene Abbildung 53 lässt sich durch folgendes Rekursionsmodell beschreiben:

$$c_{CFK}(\alpha, \phi) = (r_{00} + r_{10}\alpha + r_{01}\phi + r_{20}\alpha^2 + r_{11}\alpha\phi + r_{02}\phi^2 + r_{30}\alpha^3 + r_{21}\alpha^2\phi + r_{12}\alpha\phi^2) \frac{m}{s} \quad 6-11$$

Das Regressionsmodell kann unter Verwendung der Regressionsparameter (siehe Tabelle 17) die Messstellen mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9062$ darstellen.

Regressionsparameter	r_{00}	r_{10}	r_{01}	r_{20}	r_{11}	r_{02}	r_{30}	r_{21}	r_{12}
Wert	-1511	48,56	-13,41	23,57	4,273	-56,33	16,69	1,392	-11,9

Tabelle 17: Regressionsparameter für $c_{CFK}(\alpha, \phi)$

Bei der qualitativen Betrachtung der Abbildung 53 wird ein nicht durchgängiger Anstieg der Schallgeschwindigkeit bei steigendem Faservolumengehalt erkennbar. Dies wird in der Draufsicht (siehe Abbildung 54) verdeutlicht.

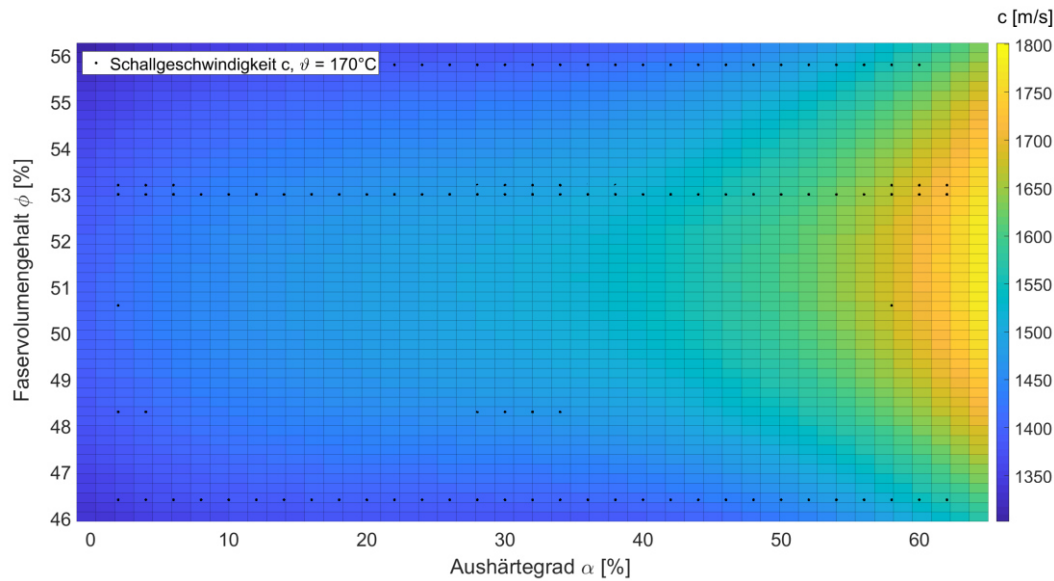


Abbildung 54: Draufsicht der Darstellung der Einflüsse des Aushärtegrades und des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit im Versuch CFK-170

Das gewählte Regressionsmodell führt zu der Ausbildung eines globalen Maximums der Schallgeschwindigkeit bei einem Faservolumengehalt von $\phi \approx 51\%$ und einem Aushärtegrad von $\alpha = 66\%$. Dies widerspricht den in Kapitel 2.2 aufgeführten Grundlagen zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit, in denen der Zusammenhang zwischen dem E-Modul und der longitudinalen Schallgeschwindigkeit (siehe Gleichung 2-3) erläutert wird. Laut dieser Gleichung folgt aus steigendem E-Modul eine Erhöhung der Schallgeschwindigkeit. Da der E-Modul des Harzsystems geringer ist, als der der Kohlenstofffasern, wird durch die Zunahme des Faservolumengehalts ein höherer E-Modul des Verbundes erreicht und infolgedessen auch eine höhere Schallgeschwindigkeit berechnet.

Das aufgezeichnete Verhalten kann aus einer nicht gleichmäßigen Aushärtung und den damit verbundenen Einflüssen auf die Dichte, der Querkontraktion und den resultierenden E-Moduln oder aus Messungenauigkeiten resultieren. Mit der Durchführung weiterer Versuche für die kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe kann das erhaltene Regressionsmodell in zukünftig gegengeprüft werden.

6.7 Methode zur Berechnung der Laminatdicke

In den vorangegangenen Kapiteln konnten die Einflussgrößen auf die Schallgeschwindigkeit durch eine oder zwei Variablen charakterisiert werden. Im Folgenden soll gezeigt werden, unter welchen Voraussetzungen die Regressionsmodelle genutzt werden können, um eine Laminatdickenmessung zu ermöglichen.

Die Voraussetzungen lauten:

1. Gleicher Temperaturverlauf an der Prüfstelle und im unverstärkten Harzbereich
 $\vartheta_{PS} \approx \vartheta_{RH}$
2. Gleicher Aushärtegrad an der Prüfstelle und im unverstärkten Harzbereich
 $\alpha_{PS} \approx \alpha_{RH}$
3. Kenntnis über die Schallgeschwindigkeit des unverstärkten Harzes c_{RH}
4. Bekannte Signallaufzeiten an der Prüfstelle τ_{PS}
5. Geringe Variationen des Faservolumengehalts ϕ

Die ersten zwei Bedingungen sind für langsam aushärtende und schnell imprägnierbare Bauteile sowie bei einem geringen Abstand der Messstellen gegeben. Die dritte und vierte Bedingung sind durch konstruktionstechnische Maßnahmen realisierbar. Die geringe Variation des Faservolumengehalts ist hingegen, insbesondere bei open-mould Prozessen, nicht gegeben. Der hieraus resultierende Fehler muss daher abgeschätzt werden. Eine mögliche Beispielrechnung wird im Anhang 9.9 vorgestellt.

Unter der Prämisse, dass der Fehler im akzeptablen Bereich liegt und die genannten Anforderungen erfüllt sind, kann die Laminatdickenberechnung erfolgen.

Da die Schallgeschwindigkeit im unverstärkten Harzbereich und die Temperierung bekannt sind, kann durch die Umstellung des Regressionsmodells für $c_{RH}(\alpha, \vartheta)$ (Gleichung 6-8 und Tabelle 13) nach α der Aushärtegrad im Reinharzgebiet α_{RH} zu jedem Zeitpunkt bestimmt werden.

Die Bedingungen eins und zwei fordern die gleiche Temperierung an der zu überprüfenden Stelle und im Reinharzgebiet. Durch Kenntnis des Aushärtegrades und der Temperatur kann über das Regressionsmodell für $c_{GFK}(\alpha, \vartheta)$ (Gleichung 6-8 und Tabelle 14) die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden.

Die vierte Bedingung setzt voraus, dass die Signallaufzeiten an der zu überprüfenden Stelle messbar sind. Im Falle einer Durchschallungsmessung ist dies $\tau(Ps)_{DS}$, wodurch die Laminatdicke an der Prüfstelle d_{PS} wie folgt berechnet werden kann:

$$d_{PS} = \tau(Ps)_{DS} * c_{GFK}(\alpha, \vartheta)$$

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird die im Aushärteprozess auftretende Schallgeschwindigkeitsänderung von Faserverbundkunststoffen untersucht. Die Schallgeschwindigkeit ist von der Temperatur, Faservolumengehalt, Aushärtegrad sowie vom verwendeten Faserhalbzeug und Harzsystem abhängig. Durch Kenntnisse dieser Zusammenhänge lässt sich, mithilfe von Ultraschallsensoren, aus der Signallaufzeit und der Schallgeschwindigkeit die Laminatdicke von Faserverbundkunststoffen berechnen. Somit kann die Aushärtung überwacht und in den Fertigungsprozess eingegriffen werden, wodurch engere Toleranzen realisierbar sind.

Im Stand der Technik gibt es bisher nur wenige Untersuchungen bezüglich der Einflussgrößen auf die Schallgeschwindigkeit und der Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern. Deshalb wurde ein Formwerkzeug entwickelt, welches die gezielte Veränderung der zu untersuchenden Parameter erlaubt. Das Formwerkzeug wurde für Versuche mit glasfaserverstärkten und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen genutzt. Darüber hinaus ermöglicht es die Messung der Schallgeschwindigkeit im Reinharzbereich.

Für die Durchführung von Versuchen mit glasfaserverstärkten Kunststoffen konnte das Formwerkzeug zuverlässig verwendet werden. Bei kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen traten Entformungsprobleme auf, die zu einer Verzögerung des Versuchsplans führten und in einer geringeren Anzahl an CFK-Versuchen resultierten.

Anhand der Messdaten wurde der Einfluss von jeweils einer Einflussgröße auf die Schallgeschwindigkeit charakterisiert. Für die GFK-Versuche wurden Regressionsmodelle mit einem hohen Bestimmtheitsmaß für die Beschreibung der Parameter erreicht. Bei den CFK-Versuchen konnte der Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit nicht bestimmt werden, weil anhand der Messdaten kein Zusammenhang ableitbar war.

Auf Grund dieser Erkenntnisse wurden dreidimensionale polynomiale Regressionsmodelle entwickelt, die eine Beschreibung der Schallgeschwindigkeit von zwei Variablen ermöglichen und die Wechselwirkung zwischen den Parametern visualisieren. Als Polynomgrad wurden die eindimensional bestimmten Charakteristiken genutzt. Mit dieser

Methodik wird über alle erstellbaren Modelle ein Bestimmtheitsgrad von ungefähr 90% erreicht. Die Bildung eines Modells, welches die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit aller Variablen beschreibt, konnte in dieser Arbeit nicht erreicht werden. In weiteren Arbeiten kann überprüft werden, ob dieser Zusammenhang durch maschinelles Lernen beschrieben werden kann. Für die untersuchten Fälle wurde die Forschungshypothese beantwortet und eine Grundlage zur mathematischen Beschreibung der Abhängigkeiten der Einflussgrößen auf die Schallgeschwindigkeit konnte vorgestellt werden.

Für aufbauende Arbeiten ist die Durchführung von weiteren CFK-Versuchen sinnvoll, damit der Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden kann. Dafür ist eine Weiterentwicklung des Formwerkzeuges nötig, um Entformungsproblemen entgegenzuwirken. Dies kann beispielsweise durch größere Entformungsschrägen realisiert werden. Für die Versuchsoptimierung zur Charakterisierung weiterer Faserhalbzeuge kann ein Versuchsplan entwickelt werden, um die optimale Anzahl an durchzuführenden Versuchen zu ermitteln, damit ein Material bezüglich der Auswirkungen der Einflussgrößen auf die Schallgeschwindigkeit mathematisch beschrieben werden kann.

Da in dieser Arbeit zur Bestimmung des Aushärtegrades ein mathematisches Modell verwendet wurde, können zur Validierung der Daten weitere DSC-Messungen durchgeführt werden. Falls diese Daten von dem Modell abweichen, muss das mathematische Modell angepasst werden.

Sofern diese Messungen vorliegen, kann der versuchsübergreifende Abbruch des Durchschallungssignals untersucht werden, welcher bei der Analyse der Ultraschallsignale aufgetreten ist. Erste Untersuchungen der Abbruchzeiten und der Schallgeschwindigkeitsverläufe deuten darauf hin, dass der Signalabbruch mit der Vitrifikation des Harzes einhergeht. Falls sich diese These bewahrheitet, kann hiermit der optimale Zeitpunkt zum Start des Abkühlprozesses bestimmt und die Aussagekraft der Ultraschallsensorik gesteigert werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] P. Ermanni, Leichtbau - Skript zur Vorlesung 151-3207-00L, Zürich: ETH - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2015.
- [2] H. Schürmann, Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [3] M. Flemming, G. Ziegmann und S. Roth, Faserverbundbauweisen - Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1999.
- [4] M. Wiedemann, Vorlesungsskript: Adaptiver Leichtbau, 2015.
- [5] E. Witten, „Composites-Marktbericht 2017,“ September 2017. [Online]. Available: <https://www.carbon-composites.eu/media/2996/ccev-avk-marktbericht-2017.pdf>. [Zugriff am 8 August 2018].
- [6] SAERTEX, „Einsatz von multiaxialen Gelege im Automobilbereich: Herstellung, Vorteile und Verarbeitung,“ 2011. [Online]. Available: <http://alumag.com/wp-content/uploads/2013/11/RCOM11.2011SAERTEXLecture.pdf>. [Zugriff am 15 Juni 2018].
- [7] M. Wacker, P. Trawiel und G. W. Ehrenstein, „Härtung von Reaktionsharzen Time-Temperature-Transition-Diagramm,“ [Online]. Available: <https://www.lkt.tf.fau.de/files/2017/06/Haertung-von-Reaktionsharzen.pdf>. [Zugriff am 10 Juli 2018].
- [8] R. P. Theriault, J. Wolfrum und G. W. Ehrenstein, „Härtungsverlauf von Harzsystemen,“ in *Kunststoffe*, Erlangen, Carl Hanser Verlag, 1999, pp. 112-116.
- [9] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.

- [10] P. Ermanni, „Liquid Composites Moulding (LCM-Verfahren),“ in *Composites Technologie*, Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2007, p. 275.
- [11] L. Kallenbach, Experimentelle Analyse des Verhaltens von Dry-Spots im Druckfeld eines Liquid Composite Moulding Prozesses, Braunschweig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2015.
- [12] F. N. Nezami, Automatisiertes Preforming von Kohlefaserhalbzeugen mit aktiven Materialführungssystemen zur Herstellung komplexer Faserverbundstrukturen, Dresden: Technische Universität Dresden, 2015.
- [13] R. Kaps, Kombinierte Prepreg- und Infusionstechnologie für integrale Faserverbundstrukturen, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2019.
- [14] L. Trampe, Messung der Bauteildicke während der Harzvakuuminfusion und Untersuchung der Einflussparameter, Technische Universität Braunschweig, 2016.
- [15] M. Kleineberg, Präzisionsfertigung komplexer CFK-Profile am Beispiel Rumpfspann, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2008.
- [16] J. Krautkrämer und H. Krautkrämer, Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1986.
- [17] N. Liebers, Ultraschallsensorgeführte Infusions- und Aushärtprozesse für Faserverbundkunststoffe, Braunschweig: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2017.
- [18] S. Anteboth, Simulation des elektromechanischen Verhaltens von PZT mit realer Domänenstruktur, Universität Kassel, 2006.
- [19] PI Ceramic, „Grundlagen der Piezotechnologie,“ [Online]. Available: <https://www.piceramic.de/de/piezo-technologie/grundlagen/>. [Zugriff am 19 Juli 2018].

- [20] A. Fröhlich, Mikromechanisches Modell zur Ermittlung effektiver Materialeigenschaften von piezoelektrischen Polykristallen, Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2001.
- [21] P. I. Karkanis, Cure Modelling and Monitoring of Epoxy / Amine Resin Systems, Cranfield University, 1998.
- [22] N. G. Pantelelis und E. Bistekos, Process monitoring and control for the production of CFRP components, 2010.
- [23] J. Lawrence u. a., „An approach to couple mold design and on-line control to manufacture complex composite parts by resin transfer molding,“ *Composites A: Applied Science and Manufacturing*, pp. 981-990, 2002.
- [24] G. Pandey u. a., „Smart tooling with integrated time domain reflectometry sensing line for non-invasive flow and cure monitoring during composites manufacturing,“ *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, pp. 102-108, 2013.
- [25] L. C., M. Cao, R. Wang, Z. Wang, Y. Qiao und L. Wan, „Fiber-optic composite cure sensor: monitoring the curing process of composite material based on intensity modulation,“ *Composites Science and Technology*, pp. 1749-1758, 2003.
- [26] K. S. C. Kuang und R. Kenny, „Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials,“ *Composites Science and Technology* 61, pp. 1379-1387, 7 März 2001.
- [27] J. Bernstein und J. W. Wagner, „Fiber optic sensors for use in monitoring flow front in vacuum resin transfer molding processes,“ in *Review of Scientific Instruments*, Vol. 86, No. 5, Maryland, American Institute of Physics, 1997, pp. 2156-2157.
- [28] K.-T. Hsiao, R. Little, O. Restrepo und B. Minaie., „A study of direct cure kinetics characterization during liquid composite molding,“ *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, pp. 925-933, 2006.

- [29] C. Di Fratta, F. Klunker und P. Ermanny, „A methodology for flow-front estimation in LCM processes based on pressure sensors,“ *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, pp. 1-11, 2013.
- [30] S. Konstantopoulos, E. Fauster und R. Schledjewski, „Monitoring the production of FRP composites: A review of in-line sensing methods,“ *eXpress Polymer Letters Vol.8, No.11*, pp. 823-840, 2014.
- [31] J. López-Higuera, L. Rodriguez-Cobo, A. Q. Incera und A. Cobo, „Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring,“ *Journal of Lightwave Technology*, pp. 587-608, Februar 2011.
- [32] B. Zhang, B. Benmokrane, J.-F. Nicole und R. Masmoudi, „Evaluation of fibre optic sensors for structural condition monitoring,“ in *Materials and Structures*, Springer, 2001, pp. 357-364.
- [33] K. Reif, Sensoren im Kraftfahrzeug, Friedrichshafen: Springer Vieweg, 2016.
- [34] K.-S. Kim, M. Breslauer und G. S. Springer, „The Effect of Embedded Sensors on the Strength of Composite Laminates,“ *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Nr. Vol. 11, No. 8., 1992.
- [35] E. F. Crawley und J. De Luis, „Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures,“ *AIAA Journal*, Nr. Vol. 25, No. 10, 1987.
- [36] S. Masmoudi, A. El Mahi und S. Turki, „Use of piezoelectric as acoustic emission sensor for in situ monitoring of composite structures,“ *Composites Part B*, pp. 307-320, 2015.
- [37] R. S. Ostwal und A. V. Sawant, „Ultrasonic Testing of Fiber Reinforced Polymer Composites- An Overview,“ *International Journal of Engineering Research & Technologie (IJERT)*, pp. 544-547, June 2014.
- [38] Olympus, „Winkelschallköpfe,“ Olympus, [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/de/ultrasonic-transducers/angle-beam>. [Zugriff am 6 August 2018].

- [39] D. J. Roth, „Using a Single Transducer Ultrasonic Imaging Method to Eliminate the Effect of Thickness Variation in the Images of Ceramic and Composite Plates,“ *Journal of Nondestructive Evaluation*, pp. 101-120, 1997.
- [40] T. Nelligan, „An Introduction to Ultrasonic Thickness Gaging,“ Olympus, [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/de/applications-and-solutions/introductory-ultrasonics/introduction-thickness-gaging/>. [Zugriff am 10 August 2018].
- [41] D. Volker, M. Platte und M. Vogt, Ultraschallprüfung Grundlagen und industrielle Anwendungen, Springer-Verlag, 1997.
- [42] M. Perterer, M. Wedekind und H. Baier, Imperfektionsbewertung von Faserverbund-Metallstrukturen mit zerstörungsfreien Prüfverfahren, Garching: Technische Universität München.
- [43] R. Oster, „Herausforderungen an die ZfP bei Ihrer Anwendung an Faserverbundbauteilen,“ in *DACH-Jahrestagung*, Gratz, 2012.
- [44] J. Döring, W. Stark, J. McHugh, J. Bartusch und P. Fengler, „Rheologische und akustische Bestimmung der Fließ-Härtungseigenschaften von Injektionsharzen,“ in *DGZfP-Jahrestagung 2002*, 2002.
- [45] J. Dorighi, S. Krishnaswamy und J. Achenbach, „A Fiber Optic Ultrasonic System to Monitor the Cure of Epoxy,“ *Research in Nondestructive Evaluation*, pp. 13-24, 1997.
- [46] N. Liebers, „In-Situ Laminatdickenmessung während der Infusion und Aushärtung von Faserverbundkunststoffen,“ in *DGZfP-Jahrestagung*, 2014.
- [47] Gleich Aluminium, „www.gleich.de,“ 12 Juli 2016. [Online]. Available: <https://gleich.de/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/07/produktdatenblatt-en-aw-5083-aluminium-walzplatte.pdf>. [Zugriff am 10 April 2018].
- [48] W. Exner u. a., „Impact of nanoparticles on the process-induced distortions of carbon fiber reinforced plastics: An experimental and simulative approach,“ *Journal of Applied Polymer Science*, Bd. 135, Nr. 47031, 2018.

- [49] P. Kersten, Mechanik - smart gelöst, Berlin: Springer-Verlag, 2017.
- [50] DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, „RTM 6 CHT- und TTT-Studie,“ Interner Bericht, Braunschweig.
- [51] Polymer Service GmbH Merseburg, „Akustische Prüfverfahren Ultraschall,“ 18 Dezember 2017. [Online]. Available: https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Brechung_Schallwellen. [Zugriff am 14 Juli 2018].
- [52] R. Grimberg, A. Savin, R. Steigmann und J. Grum, „Determination of Elastic Properties of CFRP Using Lamb Waves Resonant Spectroscopy,“ 2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010 - We.5.B.1, 2010.

9 Anhang

9.1 Technisches Datenblatt RTM 6



Description

HexFlow® RTM 6 is a degassed, monocomponent resin specifically designed for resin transfer moulding (RTM) processes and to fulfill the requirements of the aerospace industry.

Nature

HexFlow® RTM 6 is a premixed epoxy system for service temperatures from -60°C up to 120°C (-75°F up to 248°F). At room temperature, it is a brown translucent paste but its viscosity decreases quickly by increasing the resin temperature.

Advantages

- Monocomponent system
- Already degassed. Ready for use
- High glass transition temperature
- Excellent hot/wet properties
- Easy to process (low injection pressure)
- Long injection window ≥ 150 min at recommended injection temp.
- Low moisture absorption
- Short, simple cure cycles

Transport classification

Product classification:

- HexFlow® RTM 6 Mono-Component: UN 3233 division 4.1 (type C)

Availability

HexFlow® RTM 6 resin is available with a wide range of Injectex®, HexForce® and multiaxial fabrics (carbon, glass, aramid, hybrid).

Storage

- | | | |
|-------------------------|---------|-----------------|
| ■ Shelf Life | @ 23°C | 15 days maximum |
| ■ Guaranteed Shelf Life | @ -18°C | 9 months |

Typical Resin Properties

Gel Time

Temperature (°C)	Time (min)
120	> 240
140	95
180	30
210	12
240	5

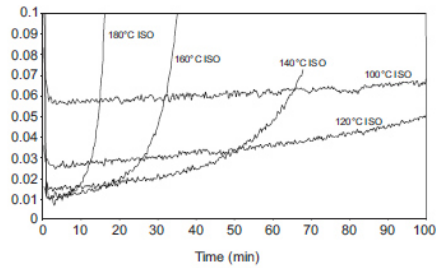




HexFlow® RTM 6

Viscosity Profile

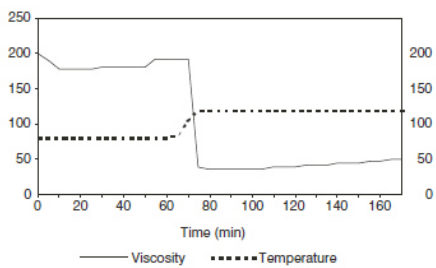
Complex viscosity (Pas)



HexFlow® RTM 6 Isothermal viscosity

Viscosity (mPa.s)

Temperature °C



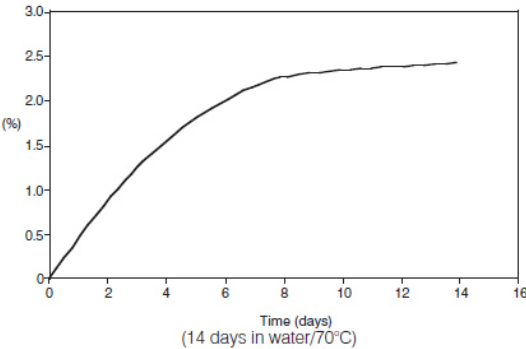
Viscosity for a standard injection cycle

Viscosity evolution versus storage time at 80°C

	Initial viscosity 120°C (mPa.s)	Viscosity after 2h at 120°C (mPa.s)
T0	33	59
T0 + 2h30 80°C	32	59
T0 + 5h00 80°C	33	63
T0 + 7h30 80°C	35	75
T0 + 10h00 80°C	38	89

T0: time to reach 80°C.

Water Pick-up (neat resin)



180°C mono-component epoxy system for Resin Transfer Moulding and Infusion technologies
Neat Resin Properties

	Tensile	Flexure
Strength (MPa)	75	132
Modulus (MPa)	2890	3300
Strain (%)	3.4	
Standard specifications	ASTM D638	ASTM D790

Uncured resin density: 1.11 g/cm³ at 25°C
 Cured resin density: 1.14 g/cm³ at 25°C
 Fracture toughness
 (G_{IC}/ASTM D 5045): 89 J/m²
 Coefficient of Thermal Expansion: 52.7 e-6 /K

Properties on Composite Laminate

Composition of the laminate: Injectex® G0926: 5H Satin weave of 370g/m², HR 6K
 Epoxy powdered fabric
 Fibre volume fraction: 57%
 HexFlow® RTM 6 resin
 Inject the resin under vacuum/low pressure (1 to 5 bar)
 Cure cycle 120 min at 180°C - no postcure

Dry/RT Properties

	Tensile Warp	I.L.S. Warp	Compression Warp	In Plane Shear
Strength (MPa)	860	62	680	95
Modulus (GPa)	67	-	60	4.3
Standard specifications	EN 2597 B	EN 2563	EN 2850 A1	EN 6031

Values obtained for G0926 SD (AS4C J) E01 RTM6



HexFlow® RTM 6

Wet/70°C Properties

	Tensile Warp	I.L.S. Warp	Compression Warp	IPS
Strength (MPa)	895	44	370	78
Modulus (GPa)	65	-	63	3.5
Standard specifications	ISO 527-4 Type 3	EN 2563	EN 2850 A1	EN 6031

Values obtained for G0926 SD (AS4C J) E01 RTM6

Process Specification

Injection:

- Preheat resin at 80°C
- Preheat the mould at 120°C
- Inject the resin (80°C) under vacuum/low pressure (1 to 5 bars)

Please consult: HexFlow®RTM6/RTM6-2 Safety & Processing Recommendations for Injection & Infusion for more information.

Standard Cure and Post-cure Cycle

Recommended cure cycle : 120 min at 180 °C - no postcure

Cure Cycle Possibilities

	Cycle N°1 (*)	Cycle N°2 (*)
Temperature 180 °C	120 min	90 min
DMA dry - Glass Transition		
- E' onset value	202 °C	194 °C
- E'' peak	210 °C	206 °C
- Tan δ peak	215 °C	211 °C
Moisture weight gain (70°C/85%RH, equil)	0.80 %	0.84 %
DMA wet - Glass Transition		
- E' onset value	160 °C	155 °C
- E'' peak	170 °C	175 °C
- Tan δ peak	175 °C	190 °C

(*) Laminate Data G0926 SD (AS4C J) E01 RTM6

Important

All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purposes required. All sales are made subject to our standard terms of sale which include limitations on liability and other important terms.

*Copyright Hexcel Corporation
Publication ITA 065g (January 2016)

For More Information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and other demanding industries. Our comprehensive product range includes:

- Carbon Fibre
- Reinforcement Fabrics
- Carbon, glass, aramid and hybrid prepregs
- RTM Materials
- HexTOOL® composite tooling material
- Structural Film Adhesives
- Honeycomb Cores
- Engineered Core

For US quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734

For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list please go to:

<http://www.hexcel.com/OurCompany/sales-offices>

9.2 Technisches Datenblatt AL-Legierung EN AW 5083



Al Walzplatten
EN AW 5083
TECHNISCHES DATENBLATT

EN AW 5083

Werkstoffangaben	
Legierung	EN AW 5083 [AlMg4,5Mn0,7]
Legierungstyp	nicht aushärtbar, naturhart
Werkstoffzustand	H111
Oberfläche	walzblank oder gebürstet

Mechanische Eigenschaften ¹⁾		dickenabhängig
Dehngrenze $R_{0,2}$	[MPa]	115 – 125
Zugfestigkeit R_m	[MPa]	270 – 275
Bruchdehnung A_{50}	[%]	14 – 16
Härte HBW	[2,5/62,5]	73 – 75

Physikalische Eigenschaften ¹⁾		typische Werte
Dichte	[g/cm ³]	2,66
Elastizitätsmodul	[GPa]	70
Elektrische Leitfähigkeit	[m/Ω · mm ²]	16 – 19
Wärmeausdehnungskoeffizient	[K ⁻¹ · 10 ⁻⁶]	24,2
Wärmeleitfähigkeit	[W/m · K]	110 – 140
Spezifische Wärmekapazität	[J/kg · K]	900

Technologische Eigenschaften ²⁾	
Formstabilität / Eigenspannung	3 – 4
Zerspanbarkeit	2
Erodierbarkeit	1
Schweißen (Gas / WIG / MIG / Widerstand / EB)	4 / 2 / 2 / 2 / 1
Korrosionsbeständigkeit (Meerwasser / Witterung / SpRK)	1 / 1 / 4
Temperatureinsatz (max. °C bei Dauer / Kurzzeiteinsatz) ³⁾	120/ 180 (siehe Fußnote)
Anodisieren (technisch / dekorativ / Hart-) ⁴⁾	2 / 4 / 2
Polierbarkeit	1 – 2
Eignung zum Strukturätzen	4
Kontakt mit Lebensmitteln (nach EN 602)	ja

Toleranzen			
bei Dicke [mm]	Ebenheit [mm] ⁵⁾	Dicke [mm]	Länge & Breite [mm]
4 – 60	EN 485-3	EN 485-3	EN 485-3
Zuschnitte			DIN ISO 2768-1m

Standard Lieferprogramm		
Platten Formate [mm]	1.520 × 3.020	in Dicken von 4 – 60 mm
Platten Dicke [mm]	4 ; 5 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12 ; 15	
	20 ; 25 ; 30 ; 35 ; 40 ; 50 ; 60	

Andere Abmessungen auf Anfrage

Stand: 12.07.2016

- 1) Typische Werte bei Raumtemperatur.
 2) Relative Bewertung der Aluminiumwerkstoffe von 1 (sehr gut) bis 6 (ungeeignet).
 3) Ohne Festigkeitsverlust nach Abkühlung.
 4) Ausschl. technisches Anodisieren. Keine Gewährleistung auf Farbgestaltung/-ausbildung.
 5) Die Ebenheitstoleranzen werden ausschließlich an ganzen Platten (pro Meter) auf Messtischen ermittelt.
 unter dynamischer Belastung: 70/ 90

9.3 Technisches Datenblatt Viton-Dichtungsring

MENZEL & SEYFRIED

Technisches Datenblatt

FPM 75, 75 +/-5 Shore A schwarz (z. B. Viton)

Fluor-Elastomerplatte (Viton)

Beständig gegen Öle, Fette, Treibstoffe, Lösemittel. Bestens alterungs-, Licht-, Wetter und Ozonbeständig.

Geeignet für Temperaturen von etwa -20 bis + 200°C, kurzzeitig höhere Temperaturen möglich.

Härte: ca. 75° Shore A

Spez. Gewicht: ca. 1,9

Eigenschaften

Härte Shore A DIN 53505	70 – 80	SHA
Farbe	schwarz	
Temperaturbereich	-20 bis +250 °C	
Reißfestigkeit DIN 53504	9	MPa
Reißdehnung DIN 53504	180	%
Druckverformungsrest ISO 815	22 h, 200 °C, 19 %	
Ölbeständigkeit	gut	
Benzinbeständigkeit	gut	
Säurebeständigkeit	gut	
Laugenbeständigkeit	gut	
Ozonbeständigkeit	sehr gut	
Witterungsbeständigkeit	sehr gut	
Bemerkungen	Spitzentemperatur kurzzeitig 300 °C	
Handelsname	Bisphenolisch vernetzt	
UV-beständig	Viton, Fluorel, Tecnoflon	
Durchschlagswiderstand: 10,2 KV/mm		
Oberflächenwiderstand: $2,5 \times 10^{11} \Omega$		
Spez. Durchgangswiderstand: $1,6 \times 10^{11} \Omega \times \text{cm}$		

Stand: 15.07.2009

Normverweisungen entsprechen dem Ausgabestand des Datenblattes unseres Rohstofflieferanten. Alle Angaben sind Mittelwerte. Unsere Empfehlungen erfolgen nach bestem Wissen. Sie sind jedoch unverbindlich und schließen jede Haftung für Schäden und Nachteile, gleich welcher Art, auch in Bezug auf Schutzrechte Dritter, aus. Sie befreien den Käufer nicht von eigenen Versuchen und Prüfungen.

M & S GmbH
Danziger Straße 19 / Postfach 11 55
82194 Gröbenzell
Telefon (08142) 5001-0
Telefax (08142) 5001-35

Münchner Bank, Gröbenzell
Konto: 37 90 34 (BLZ 701 900 00)
IBAN: DE7070190000000379034
BIC: GENODEF1M01
HRB 161782 München Sitz: Gröbenzell

Ust-Id-Nr. DE 247988881
Finanzamt Fürstenfeldbruck
GF: Gerhard Schuschu
www.gummi-menzel.de
Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2000
Es gelten unsere allgemeinen Geschäftsbedingungen. Diese können Sie einsehen unter www.menzel-seyfried.de

9.4 Datenblatt Ultraschallsensor PIC255



Piezo Material Data

SPECIFIC PARAMETERS OF THE STANDARD MATERIALS

"Soft"							
		Unit	PIC151	PIC255	PIC155	PIC153	PIC152
Physical and dielectric properties							
Density	ρ	g/cm ³	7.80	7.80	7.80	7.60	7.70
Curie temperature	T_c	°C	250	350	345	185	340
Relative permittivity	in the polarization direction \perp to polarity	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	2400	1750	1450	4200	1350
		$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$	1980	1650	1400		
Dielectric loss factor	$\tan \delta$	10 ⁻³	20	20	20	30	15
Electro-mechanical properties							
Coupling factor	k_p		0.62	0.62	0.62	0.62	0.48
	k_t		0.53	0.47	0.48		
	k_{31}		0.38	0.35	0.35		
	k_{33}		0.69	0.69	0.69		0.58
	k_{15}			0.66			
Piezoelectric voltage coefficient	d_{31}		-210	-180	-165		
	d_{33}	10 ⁻¹² C/N	500	400	360	600	300
	d_{15}			550			
Piezoelectric voltage coefficient	g_{31}	10 ⁻³ Vm/N	-11.5	-11.3	-12.9		
	g_{33}		22	25	27	16	25
Acousto-mechanical properties							
Frequency coefficients of the series resonance frequency	N_p		1950	2000	1960	1960	2250
	N_1		1500	1420	1500		
	N_3	Hz · m	1750		1780		
	N_t		1950	2000	1990	1960	1920
Elastic compliance coefficient	S_{11}^E	10 ⁻¹² m ² /N	15.0	16.1	15.6		
	S_{33}^E		19.0	20.7	19.7		
Elastic stiffness coefficient	C_{33}^D	10 ¹⁰ N/m ²	10.0		11.1		
Mechanical quality factor	Q_m		100	80	80	50	100
Temperature stability							
Temperature coefficient of ϵ_{33}^T (in the range -20 °C to +125 °C)	$TK \epsilon_{33}$	10 ⁻³ / K	6	4	6	5	2
Time stability (relative change of the parameter per decade of time in %)							
Relative permittivity	C_ϵ	%		-1.0	-2.0		
Coupling factor	C_K			-1.0	-2.0		

9.6 Technische Zeichnung - Deckel

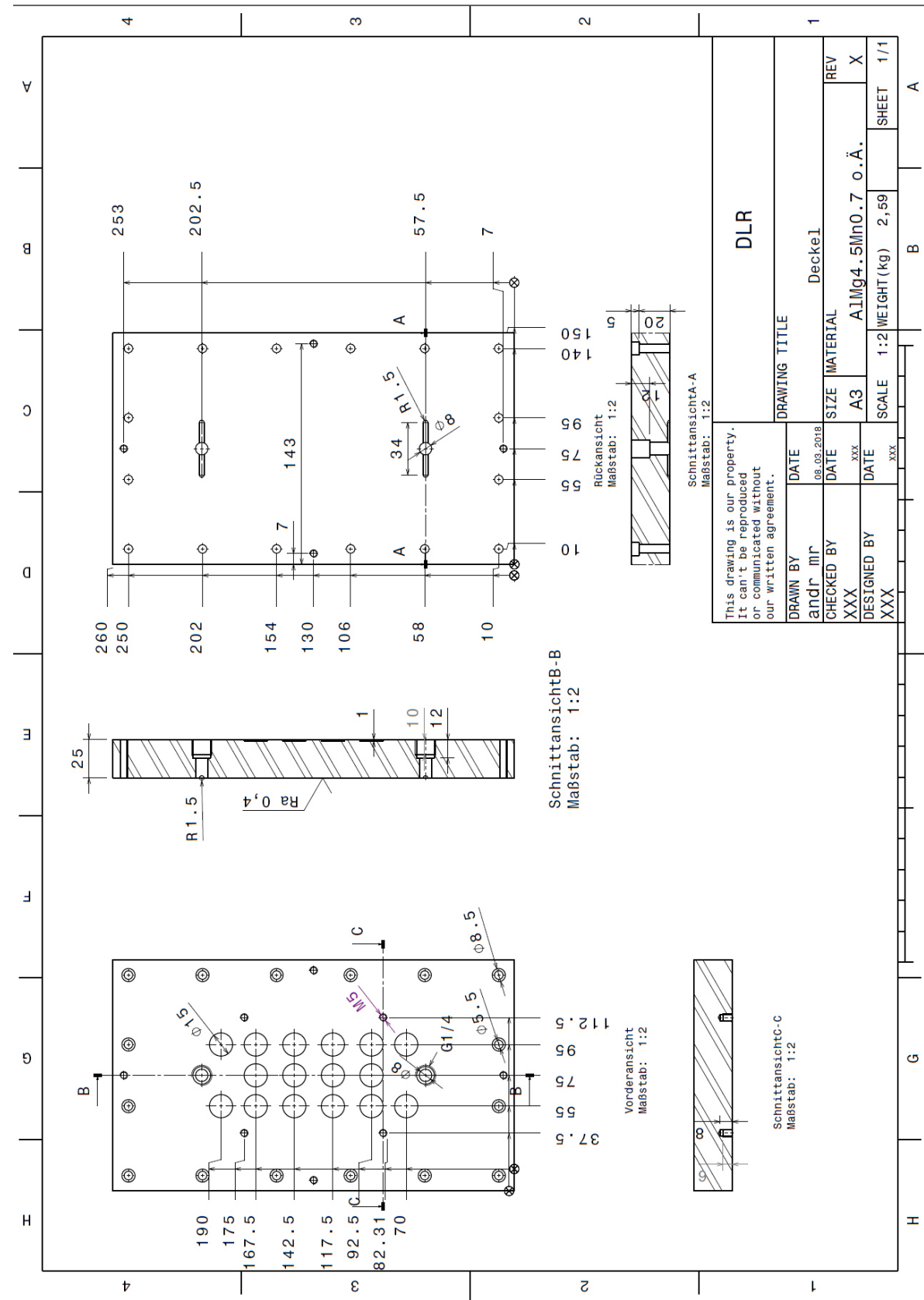


Abbildung 56: Technische Zeichnung des Formwerkzeug-Deckels (nicht maßstabsgetreu)

9.7 Datenblatt Glasfaserhalbzeug



DATENBLATT

(nach EN 13473-1)

SAP-MATERIAL-NR.
30001763

TEXTILE STRUKTUR
7000033

ARTIKEL-BEZEICHNUNG
Y-E-1217g/m²·1270mm

Z

KONSTRUKTION	FLÄCHENGEWICHT [g/m²]	TOLERANZ [+/- %]	MATERIAL
Oberlage			
0 °	709	5	E-Glas 2.400 tex
45 °	251	5	E-Glas 300 tex
-45 °	251	5	E-Glas 300 tex
Unterlage			
→ X/Y			
NÄHFADEN:	6 g/m²	+/- 1 g/m²	PES 76 dtex

Nähbindung:	Trikot/Franse	Nähfeinheit :	5,0
Breite::	1.270 mm	Gesamttoleranz:	5,1 %
Flächengewicht:	1217 g/m²		

Abbildung 57: Technisches Datenblatt SAERTEX Y-E-1217g/m²

9.8 Datenblatt Kohlenstofffaserhalbzeug

**TEIJIN**

Technical Data Sheet

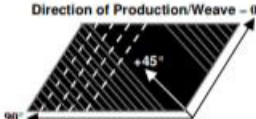
Tenax® Dry Reinforcements Non-Crimp Fabric

Brand name	Tenax®
Production site	E
Product family	DRNF
Product designation	V2-015-PB1-005-IMS65 E23 24k-TA7-0582-1270

Type of Textile	Triaxial Non-Crimp Fabric – Basic
Textile areal weight (incl. sizing, binder, toughener, stitching, etc.)	600 g/m ² ± 5%
Carbon fibre areal weight (incl. sizing)	582 g/m ² ± 5 %

NCF detail construction

Layer	Material	Areal weight [g/m ²]	Tolerance [±]
Powder Binder	EPR 05311	5	2 g/m ²
Non Woven	TA1900	5	1 g/m ²
-45°	Tenax®-E IMS65 E23 24K 830tex	194	8 g/m ²
Non Woven	TA1900	5	1 g/m ²
90°	Tenax®-E IMS65 E23 24K 830tex	194	8 g/m ²
Non Woven	TA1900	5	1 g/m ²
+45°	Tenax®-E IMS65 E23 24K 830tex	194	8 g/m ²

Stitching yarn	Co-Polyamide	2.0	0.5 g/m ²
Weave	Tricot-Pillar	 <p>Direction of Production/Weave - 0°</p> <p>+45°</p> <p>90°</p> <p>Fibre Orientation in acc. to EN13473-1</p>	
Stitching length	3.1 mm		
roll dimension	Paper core: 152 mm Roll width: 1270 mm Length: custom made		

This material is still under development.

The export or transfer of carbon fibre products can be subject to authorisation, depending on end-use and final destination.

Abbildung 58: Technisches Datenblatt Tenax-E IMS54 E23 24K 830tex

9.9 Abschätzung des Fehlers bei der Laminatdickenbestimmung

Anhand einer hypothetischen Beispielrechnung soll der Fehler bei einer Variation des Faservolumengehalts von $\phi_{\text{Soll}+\text{Variation}} = 56 \pm 5\%$ an einem beliebigen Zeitpunkt des Aushärteprozesses abgeschätzt werden³. Als Schallgeschwindigkeit für einen Faservolumengehalt von $\phi = 56\%$ wird $c_{\phi=56\%} = 1500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ angenommen. Die gemessene Signallaufzeit sei $\tau = 3 \mu\text{s}$ und ist für die untersuchten Faservolumengehalte konstant. Der Einfluss der Änderung des Faservolumengehalts auf die Schallgeschwindigkeit beträgt $8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ pro Prozentpunkt.

Damit ergibt sich für $c_{\phi=61\%}$ eine Schallgeschwindigkeit von $1540 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und für $c_{\phi=51\%}$ eine Schallgeschwindigkeit von $1460 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Die ermittelten Laminatdicken werden nach dem Durchschallungsverfahren berechnet (Gleichung 3-2). Es gilt:

$$d_{\phi} = \tau * c_{\phi}$$

In der Tabelle 18 sind die Ergebnisse der Beispielrechnung inklusive der maximalen Abweichung Δd_{max} aufgelistet.

Faservolumen- gehalt ϕ [%]	Schallgeschwin- digkeit c $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	Signallauf- zeit τ [μs]	Laminatdicke d_{ϕ} [mm]	Maximale Abwei- chung Δd_{max} [mm]
51	1460	3	4,38	0,12
56	1500	3	4,5	0
61	1540	3	4,62	0,12

Tabelle 18: Übersicht der Parameter zur Abschätzung der Auswirkungen des Fehlers bei der Variation des Faservolumengehalts um $\pm 5\%$

Im ausgewählten Beispiel entsteht bei einer Abweichung des Faservolumengehalts von fünf Prozent ein Fehler der Dickenmessung von 0,12mm. Dies entspricht einer Abweichung zur Solldicke 4,5mm von 2,67%.

³ Die Daten des Beispiels zur Abschätzung des Fehlers sind in der Größenordnung der in dieser Arbeit durchgeführten Versuche gewählt. Für andere Fertigungsbedingungen müssen die Parameter und der resultierende Fehler angepasst werden.